

الهيولاءة تصنع علما جديدا

تأليف جيمس جلايك

ترجمة على يوسف على

المشروع القومي للترجمة

الهيولية

تصنع علماً جديداً

تأليف
جيمس جلايك

ترجمة
على يوسف على



٢٠٠٠

CHAOS
Making a New Science

JAMES GLEICK

تنويه حول اسم الكتاب

اختلفت الآراء حول وضع مصطلح لعلم Chaos، فذهب رأى إلى ترجمته "علم الفوضى"، استجابة للترجمة الحرفية للمصطلح، وهو ما يرفضه المترجم رفضاً قاطعاً، حيث يجمع المصطلح بين المفهوم ونقيضه. فكما سوف يدرك القارئ الكريم، لقد قام هذا العلم الجديد لينفى صفة الفوضى عن ظواهر الطبيعة، ووضع اسم للعلم يحمل معنى ما يريد أن ينفيه أمر لا تقبله مبادئ علم المصطلح. ولعل أبلغ دليل أقدمه أن نفس الاعتراض ثائر في الغرب على مصطلح Chaos ذاته، كما سيرد في الفصل التاسع من هذا الكتاب، والذي أسبق الحوادث وأقتبس الجملة الآتية منه: "اعتبر جون هبارد مصطلح chaos اسماً فقيراً للتعبير، لكونه يعنى ضمناً الهولوية، بينما رسالة العلم الجوهرية هي أن الطبيعة تنتج بعمليات بسيطة صروحاً هائلة من التعقد دون فوضى أو عشوائية".

الاقتراح الثانى هو "علم الشواش"، ويعيبه أن علم الهولوية يفرق بين الانتظام والتشويش، ومن ثم فإن نفس الاعتراض قائم فى حق هذا الاقتراح.

ولهذه الأسباب يقترح المترجم مصطلح "الهولوية"، على أساس أنه المقابل لمصطلح chaos فى التراث العربى، ولكن ليس بمعنى الفوضى، ولكن بمعنى "المادة الأولية للكون"، وبالتالى فإن المصطلح العربى مبرراً من الاعتراضات التى ترد على الاقتراحات التى تحمل معنى الفوضى أو العشوائية. ويسعد المترجم أن حاز الاقتراح قبول شخصيات لها وزنها فى تعريب العلوم، هم الأساتذة الدكاترة بالترتيب الأبجدي للأسماء "أحمد شوقي، أحمد مستجير، جابر عصفور، سمير سرحان، محمد عناني، وعلى ذلك سارت الترجمة فى كتابي "أفكار العلم العظيمة" و"أسطورة المادة" من إصدارات الهيئة المصرية العامة للكتاب.

تتفيذ وطباعة: Stampa
تليفون: ٢٤٤٦٨٧٣ - ٢٤٦٠٢٤٤

تعريف بالمؤلف

ولد جيمس جلايك فى مدينة نيويورك
ويعيش هناك مع زوجته سينثيا كروسن.
وهو مؤلف كتاب "النايعة، أعمال وعلم
ريتشارد فاينمان".

تعريف بالمترجم

المهندس على يوسف على، من مواليد الشرقية عام ١٩٤٠
حاصل على بكالوريوس الهندسة الكهربائية قسم
الاتصالات من كلية الهندسة جامعة الاسكندرية عام ١٩٦٢
وماجستير القانون من كلية الحقوق جامعة القاهرة عام
١٩٨١ ودبلوم الترجمة من كلية الآداب جامعة الاسكندرية
عام ١٩٩٠ بدأ حياته العملية بالتعليم الصناعى ثم عمل
بمشروع السد العالى ثم فى قطاع الكهرباء، وآخر منصب
وصل إليه قبل التقاعد للتفرغ للترجمة فى مارس عام ١٩٩٨
هو رئيس قطاع الاتصالات بشركة كهرباء البحيرة.

له العديد من الكتب المترجمة فى مجال المعلوماتية وتبسيط
العلوم والروايات الأدبية، كما ساهم فى ترجمة الموسوعة
الإسلامية والموسوعة العلمية للناشئة (تحت الطبع)
الصادرة من الهيئة المصرية العامة للكتاب. ساهم فى
المشروع القومى للترجمة بكتاب "ما وراء العلم".

شكر وتقدير

يتقدم المترجم بالشكر العميق لكل من قدم له يد العون والتشجيع على ترجمة هذا الكتاب، ويخص بالشكر نيابة عن الجميع السيد الوالد الكريم، أمد الله في عمره، على قيامه بالتصحيح اللغوي وإبداء الملاحظات الأسلوبية القيمة، والأستاذ الدكتور أحمد مستجير الذي كان تشجيعه زادا معنويا لا ينكر أثره، وللسيدة زكية عبد المنعم عبد السلام مساعدة أمين مكتبة الجامعة الأمريكية على تقديم العون في الاطلاع على مراجع المكتبة المرتبطة بالموضوع، والزميل المهندس عادل عبد الجواد خبير الحاسبات، والأستاذ رأفت الفرماوى على قيامه بالقراءة النهائية للكتاب وعلى ملاحظاته القيمة التى بها أخرج فى صورته النهائية، وأخيرا إلى الحفيدتين الغاليتين سارة ومريم، إذ كانت زيارتهما فى الولايات المتحدة سببا فى الاطلاع على هذا العلم والحصول على هذا الكتاب.

إِهْلَام

إِلَى كُلِّ مَنْ أَضَاءَ
شَمْعَةً، بَدَلًا مَنْ أَنْ
يَلْعَنَ الظُّلَامَ

مقدمة المترجم

بسم الله. والصلاة والسلام على رسول الله.

القارئ الكريم

الهيولية علم جديد، ربما لم يسمع عنه بعد الأكثرية من قراء العربية. وهو علم ينتمى من الوجهة الرسمية للرياضيات، فهو فرع من فروعها. وبينما تنقسم الرياضيات عرفاً إلى بحتة وتطبيقية، فهذا الفرع الحديث يجمع بين الجانبين. وفي جانبه التطبيقي، لم يترك مجالاً علمياً إلا وقد اقتحمه، وإليك عزيزى القارئ قائمة عامة للعلوم التى يعرض لها الكتاب فى حديثه عن هذا العلم الوليد:

● الرياضيات البحتة ● الفيزياء

● علم النفس ● الاقتصاد

● الفلك ● الطب

● الجيولوجيا ● الاتصالات

● علم الزلازل ● البيولوجيا والعلوم البيئية

وليس فى هذا من عجب، لو علمت عزيزى القارئ المجال الأسمى الذى يتناوله هذا العلم، فهو يبحث ببساطة فى النظم الديناميكية، وهى النظم التى تتغير عواملها، فتتغير نتائج طبقاً لها. وبمنظرة سريعة، نجد أنه ما من علم من العلوم المذكورة إلا ويتضمن ظواهر ديناميكية، الطب فى ضربات القلب، وعلم النفس فى نبضات المخ، والاتصالات فى الإشارات المنقولة حاملة للمعلومات، والاقتصاد فى تأثر الأسواق بآليات السوق، على ذلك بقية العلوم بلا استثناء.

ومن الظواهر الديناميكية ما قتل بحثاً، ومنها ما لم يفهمه أحد من قبل. فقد اتضح أن انتشار الأوبئة، والزلازل، وتقلبات البورصة، تسير على أنساق لم يعرف لها سبب. وفى كلتا الحالتين، فإن لعلم الهيولية دوراً خطيراً فى سبر أغوار هذه النظم. على أن النظم الديناميكية تخضع لقوانين قد اكتشفت منذ أمد، وقد عهدنا فى العلم أنه يهتم

بالظواهر المنضبطة، يضع لها القوانين والنماذج الرياضية التي تمكن من فهمها، ومن التنبؤ بها.

ولكن النظم الديناميكية لا تسير على الدوام سيرا حسنا في الخضوع لهذه القوانين، فلسبب أو لآخر تنتابها الفوضوية العشوائية. في هذه الحالة، فإن العلم يقف عاجزا مكتوف اليدين. وما زالت ذاكرتي تعي إلى اليوم قول أستاذ علم الهيدروليكا لنا في الصف الثالث من كلية الهندسة، وكان ذلك عام ١٩٦٠، عما يسمى vortex motion، وهي حركة المياه الدوامية حين تهبط في فوهة بالوعة، حيث قال أنها لم تحلل علميا حتى الآن.

وكان موقف العلماء مما يبدو للنظم من خروج عن المنضبط علميا هو أن يعزى ذلك لأسباب خارجة عن النظام، كتداخل من أسباب خارجية، أو عدم دقة في أجهزة القياس، ومن ثم فهي خارجة عن التحليل العلمي للمجال، وكفى الله المؤمنين القتال. إلى أن قيض الله للعلم أفرادا لم يرضوا بهذا الموقف السلبي من عشوائية الطبيعة، فأصرروا أن يخوضوا غمارها، وانتهجوا في ذلك مسالك شتى، كل بحسب تخصصه وخلفيته العلمية. وشيئا فشيئا تكشفت لهم أسرار وخبايا تأسر اللب وتسحر الخيال.

تعلم رواد هذا العلم أولا أن ما نعتقده في مظاهر الطبيعة من عشوائية، إنما هي في الواقع عشوائية زائفة، ففي أعماقها صور من الانضباط تأخذ باللب. وقد ولد علم الهيولية لينفي هذا النوع من الجهل، الجهل بهذا الانضباط الرائع الكامن في أعماق الطبيعة، والتي تخطئه العين السطحية.

وعلى هذا الأساس فرق رواد هذا العلم بين الحوادث الصدفية البحتة random processes، كخط أوراق اللعب أو خطوات شخص ثمل، وبين الظواهر الطبيعية التي تتأبى على التحليل العلمي التقليدي وتستعصى بالتالى على التنبؤ. فهذه الأخيرة تظل خاضعة للقوانين البسيطة التي تحكمها، ومن ثم فإن عشوائيتها المزعومة تكون قابلة للتحليل العلمي، وهذا ما نهض هؤلاء الرواد للقيام به، وأطلقوا على هذه الحالة مصطلحا يليق بها، "chaos، أو الهيولية".

لقد وجدوا أن الظاهرة التي تنزع للهيولية، إنما تفعل ذلك وهي تحت سيطرة قوانينها الأولية، فهي لم تتمرد عليها البتة، بل هي "منجذبة" إليها، فكان ذلك إحياء بوضع مفهوم جوهرى في فهم مسالك الطبيعة في هيولييتها، مفهوم "الجاذب الغريب strange attractor" الذى يمثل قلب التحليل الهيولي، ولن يدخر المؤلف وسعا في بيان هذا المفهوم.

وتعلّم رُوّاد علم الهيولية أن السبب في نزوع الطبيعة إلى صور التعقد في ظواهرها قد تعزى أحيانا إلى تداخل العوامل بصورة تستعصى على التقصي، كما في حالة التنبؤ بالطقس، حيث قد يؤدي تغير طفيف للغاية إلى تأثيرات ضخمة يصعب التنبؤ بها، وقد أطلقوا على هذه الحقيقة مصطلحا طريفا: "ظاهرة الفراشة"، ويقصد به الحساسية المفرطة للتغير في العوامل الأولية المؤثرة في الظاهرة، والتي هي موضوع الفصل الأول من الكتاب.

كما يكون التعقد بسبب تداخل النتائج مع المسببات، وهو ما يسمى اصطلاحا "التغذية الخلفية feedback"، فسرعة الجسم تتأثر بالقوى المؤثرة عليه، ومنها الاحتكاك. فإذا علمنا أن الاحتكاك بدوره يعتمد على السرعة، فإننا ندرك معنى التأثير المتبادل بين العوامل والنتائج، الاحتكاك يؤثر في السرعة ويتأثر بها في نفس الوقت. يقول علماء الرياضيات للتعبير عن ذلك أن النظام يخرج عن "العلاقة الخطية linear relation" ويقصدون بذلك العلاقة السلسلة المفهومة بين المسببات والنتائج، أو بين المدخلات والمخرجات، إلى أن تكون "غير خطية non-linear". وإذا زاد معدل الارتباط بين المؤثرات والمتأثرات (معدل اللاخطية nonlinearity) عن قدر معين، فإن ذلك يؤدي إلى ظاهرة الهيولية، ولهذا السبب فإن الاسم المرادف لهذا العلم هو "النظم الديناميكية غير الخطية nonlinear dynamic systems".

ثم تعلّم رواد هذا العلم أن قواعد التحليل الهيولي chaotic analysis للنظم الديناميكية عامة لكافة النظم الديناميكية بصرف النظر عن المجال العلمي الذي تخضع له، وكانت هذه العمومية universality من أكثر اكتشافات العلم الحديث إثارة. إن الربط بين اضطرابات القلب والتشويش في قنوات الاتصالات، أو بين انتشار الأوبئة وانهيار البورصات المالية، أمر لم يكن يحلم به حالم من بعد، مهما بلغ خياله من اتساع. ولذا ليس من المستغرب ما قوبل به رواد علم الهيولية الأوائل من إنكار واستنكار، حتى قال أحدهم بعد محاضرة ألقاها: "أعلم أنهم لم يفهموني، ولكن الذي لم أفهمه، لماذا كان كل هذا العداء؟"

ولقد كان للحاسوب الفضل الأكبر في تمكين هؤلاء الرواد من المضى في سبر أغوار الهيولية واستكشاف مجاهلها، فلولا ما أمكن ذلك، هذا لأن الهيولية إنما تنشأ بسبب تكرار لعلميات بسيطة وبدائية، ولكن لملايين المرات، مما يجعل العين المجردة تخطئ النظام الكامن في النتائج. ولهذا السبب فقد لعب الحاسوب بالنسبة للرياضيات دورا طريفا، فقد حولها إلى علم تجريبي، كان الحاسوب فيه أشبه بجهاز الفيزيائي أو

مجهر البيولوجى أو قارورة الكيمياء، بعد أن ظلت لقرون عدة علما تجريديا بحثا يترفع عن أن يهبط إلى مستوى العلوم التجريبية كالفيزياء والكيمياء والبيولوجيا. لقد قاوم الرياضيون التقليديون هذا الاتجاه طويلا، ولكن رواد الهيولية رحّبوا به، ووجدوا فيه فتحا مبينا للعلم فى مساره الجديد.

لقد خاض مؤسسو علم الهيولية دربا غاية فى الوعورة، فصدقهم الله وعده ألا يضع عمل المحسنين، ويكفيهم اليوم فخرا، بعد أن أحنى الكل أخيرا رؤوسهم لهم إجلالا، أن إليهم تنسب الثورة العلمية الثالثة فى القرن العشرين، بعد ثورة النظرية الكمية والنظرية النسبية.

المترجم

مهندس / على يوسف على

محتويات الكتاب

الموضوع	الصفحة
مقدمة المترجم	١١
محتويات الكتاب	١٥
مقدمة	١٩
الفصل الأول: ظاهرة الفراشة	٢٥
لورنز يضع نموذجاً للطقس، الحاسوب يخيب أمله في التنبؤ بالطقس، النظام تحت عباءة العشوائية وعلم يظهر على أنقاض أمل ضائع، الحساسية المفرطة للظروف الأولية، عالم اللاخطية، نموذج ميكانيكي لتيارات الحمل، إكتشاف أول جاذب عجيب (جاذب لورنز).	
الفصل الثاني: ثورة علمية	٤٣
الثورات العلمية وتغير الباراديجم، الحركة البندولية بين الانتظام والهيولية، سمول يستخدم علم الطبولوجيا في تمثيل الهيولية على شكل حدود حصان، حل لغز البقعة الحمراء للمشترى	
الفصل الثالث: الحياة صعود وهبوط	٥٩
نمذجة التكاثر البيئي، يورك وماي والمعادلة اللوجستية، إكتشاف التفرع الثنائي والدخول في الهيولية.	
الفصل الرابع: هندسة للطبيعة	٧٥
إكتشاف من واقع أسعار القطن، الهارب من بارباكي، ماندلبروت الرياضى يحل لغز التشوش في خطوط الاتصالات، ويضع الأسس لهندسة جديدة، هندسة الفراكتل هي لغة الطبيعة، معضلة طول شواطئ البحار والمحيطات، أبعاد كسرية للأشكال المخيفة، مفهومي المقياسية والتماثل الذاتى للأشكال الفراكتلية، الجيوفيزياء وعلم المعادن.	

١٠١ الفصل الخامس: الجاذب العجيب

لندو وتصور الاضطرابات، تجربة سوينى وجولب تثبت خطأ نظرية لندو، رول وتاكينز يضعان مصطلح "الجاذب العجيب (أو الغريب)"، علم الهيولية يلتقى مع الهندسة الفراكتلية فى توصيف الجاذبات العجيبة، تطبيق هينون لنظرية الجاذبات الغريبة على الفلك.

١٢٧ الفصل السادس: العمومية

ويلسون وآخرون يبحثون فى عملية التحول الطوري، فايجنباوم يحذو حذو جوتة فى النظرة الشمولية للعلم، المعادلة اللوجستية تكشف عن أخطر أسرارها، رقم فايجنباوم واكتشاف ظاهرة العمومية.

١٤٧ الفصل السابع: بدء الاضطراب

تجربة لبشابر عن تيارات الحمل تكشف عن سر بدء الاضطراب، الكشف عن الدخول للهيولية معمليا.

١٦١ الفصل الثامن: صور الهيولية

الأشكال الفراكتلية وعلاقتها بالأعداد المركبة، طريقة نيوتن والطبيعة الهيولية للحدود بين المناطق (أحواض الجاذبات)، فئات جوليا وفئة ماندلبروت، أشكال غاية فى التعقيد تنبع من معادلات غاية فى البساطة، بارنسلى يضع نظرية اللصقات لتحليل أشكال الطبيعة إلى عناصرها الفراكتلية (العبة الهيولية).

١٨٣ الفصل التاسع: جماعة النظم الديناميكية

تأسيس الجماعة من أربعة رواد فى علم الهيولية، تحليل الجاذبات العجيبة، ربط علم الهيولية بنظرية المعلومات والإنتروبيا، تجربة الصنبور وإنتاج الجاذب الغريب معمليا.

٢٠٧ الفصل العاشر: الإيقاعات الداخلية

التحليل الهولى لحركة عينى مريض الشيزوفرانيا، نموذج هولى لفرض الجايا، الهيولية فى ديناميكية القلب

والأنظمة الفسيولوجية الأخرى ، مفهوم "الأمراض
الديناميكية" ، أبحاث في الساعة البيولوجية.

٢٢٩ الفصل الحادى عشر: الهىولية وما بعدها

اعتراض على مصطلح "chaos" كاسم للعلم الوليد، هل
تعطى الهىولية أملا ضد تزايد الإنتروبيا؟ التشكل الهىولى
لتكاثف الثلج، اكتشاف البعد الكسرى لانتشار مرض
الحصبة.

٢٤٣ ملاحق الكتاب (من وضع المترجم)

أ إذا عن لأحد القراء الأعزاء أن يبحث عن الموضوع على شبكة الإنترنت، فيكون ذلك تحت عنوان
الرياضيات-المترجم

أأ كم ساعنى أن أعلم أن البعض قد ترجم هذا المصطلح بـ "علم الفوضى"، ويعلم الله والراسخون فى العلم
أنه ما هو بفوضى، ولكنه عدم الإحاطة بخبايا هذا العلم الرائد. أما السبب فى اختيار هذا المصطلح فهو
أنه مستخدم فى التراث العربى بالفعل كمقابل لكلمة chaos، فيقول شوقي فى كتابه "شذور الذهب"
مخاطباً المنكر لوجود الله: "قد علمنا الهىولا، ولكننا لم ننكر اليد الطولى". ويقصد بالهىولا (أو الهىولى) فى
هذا السياق المادة الأولى للكون.

كما يسعدنى أن يوافقنى على اختيار المصطلح العربى المقابل "الهىولية" الأساتذة الأجلاء أحمد مستجير
ومحمد عنانى، ولهما فى الترجمة المكانة التى لا يجهلها أولو العلم، وقد استخدمت نفس المصطلح فى
ترجمة كتاب "أسطورة المادة" من إصدارات الهيئة المصرية العامة للكتاب - المترجم.

مقدمة المؤلف

فى عام ١٩٧٤ انتاب رجال الشرطة فى بلدة لوس ألاموس Los Alamos بولاية نيومكسكو شىء من القلق بخصوص شخص دأب على التسكع فى طرقات البلدة ليلاً، يضرب فى أرجائها على غير هدى، يتجاوب ضوء سيجارته مع وميض النجوم المتلألئة. ولم يكن رجال الشرطة هم الوحيدون الذين انتابهم العجب، فقد علم بعض باحثى المعمل الوطنى بالمدينة أن أحدث زميل لهم يعمل فى أبحاثه طبقاً لجدول زمنى قوامه يوم ذو ست وعشرين ساعة، بحيث سيؤدى عدم التوافق بين يومه ويومهم إلى أن تتداخل ساعات صحوه مع أوقات نومهم. لقد بدا الأمر غريباً حتى على قسم الأبحاث النظرية.

على مدى ثلاثة عقود منذ أن اختار روبرت أوبنهايمر Robert Oppenheimer هذه المنطقة غير الشهيرة من ولاية نيومكسكو لمشروع إنتاج القنبلة الذرية اتسع نطاق "المعمل الوطنى بلوس ألاموس Los Alamos National Laboratory" ليشغل منطقة شاسعة من هذه الهضبة، ضاماً إليه المعجلات الذرية، وأجهزة الليزر الغازية، والمعامل الكيميائية، ومع هذه الأجهزة والمعدات الآلاف من الباحثين والإداريين والفنيين، بالإضافة إلى مبنى يضم أقوى حاسوب معروف وقتئذ. ويتذكر القدامى منهم المبنى الخشبي الذى بنى على عجل فى أوائل الأربعينيات، ليكون نواة لهذا الصرح العلمى الضخم.

إن المعمل يضم فى أقسامه قسم الأبحاث النظرية، وقسم الحاسوب، وقسم الأسلحة، ويعتبر قسم الأبحاث النظرية درته، إذ يعمل به عدة مئات من الفيزيائيين والرياضيين، يحصلون على مرتبات مغرية، ويعملون فى تحرر من ضغوط التدريس ونشر الأبحاث التى يتعرض لها أقرانهم من الأكاديميين. وكانت أبحاثهم تتميز بالجدة والغرابة، ومن ثم كان من الصعب أن يثير شىء ما استغرابهم.

ولكن "ميتشل فايجنباوم Mitchell Feigenbaum" كان حالة شاذة. لم يكن له سوى بحث واحد منشور، ولم يكن يبحث فى موضوع يبدو أنه يبشر بخير. كان شعره يسقط متهدلاً فوق جبينه، يشع من عينيه القلق والرقّة، وحين يتحدث، كان حديثه سريعاً يميل إلى اللكنة الأوربية رغم كونه من أهل بروكلين. كان ينكب على العمل بنشاط محموم، وحين لا يعمل، يسير على غير هدى، ليلاً أو نهاراً، مع تفضيل الليل

على النهار فى ذلك. كان اليوم ذو الأربع والعشرين ساعة غير كاف بالنسبة له، على أن تجربته مع عدم التزامن مع اليوم الطبيعى أجبرته على التخلي عن نظامه اليومى الشاذ.

فى التاسعة والعشرين من العمر اعتُبر مرجعا لزملائه من العلماء، يلجئون إليه - حين يتمكنون من الحصول عليه - فى الشاذ والدقيق من الموضوعات. وصل ذات يوم للمعمل حين كان مديره، "هارولد أجنيو Harold Agnew" على وشك مغادرته. كان أجنيو شخصية قوية، عمل كمساعد لأوبنهايمر فى مشروع القنبلة التى أُلقيت على هيروشيما. وقد واجه فايجنباوم قائلا: " أعلم أنك على قدر عال من الذكاء، ولكن لو كنت على هذا القدر من الذكاء، لماذا لا تحل مشكلة اندماج الليزر laser fusion؟"

حتى أقرب أصدقاء فايجنباوم كانوا على شك من أن ينتج شيئا ذا قيمة. فهو لم يكن يبدى اهتماماً بأن يُسخر أبحاثه لشيء يبشر بعائد ما، رغم ما كان يسحرهم به من إجاباته الإرتجالية. كان يفكر فى الاضطرابات فى السوائل والغازات، وفى طبيعة الزمن، هل يسرى سلسا أم يطفر فى كمّات ٢ متتالية كما يحدث للصور السينمائية؟ وفى كيفية رؤية العين للألوان والأشكال، فى عالم يعلم الفيزيائيون أنه لا يعترف بالتحديد القاطع من وجهة نظر النظرية الكميّة. كان يراقب السحب من نافذة طائرة أبحاثه (فى عام ١٩٧٥ سحب منه امتيازات التنقل، على أساس أنه قد تجاوز الحد فى استخدام هذه الميزة)، أو من فوق سطح مبنى المعمل.

فى البلدة الجبلية من الغرب الأمريكى، لم تكن السحب تشبه الغمام الداكن عديم الشكل الذى ينساب على ارتفاع منخفض كما يحدث فى الشرق. ففي لوس ألamos، تلك البلدة التى تحتضن بركانا هائلا، تتناثر السحب عبر السماء، فى تكوينات عشوائية، نعم، ولكنها أيضا ليست عشوائية، ثابتة فى تشكيلات إيرية، أو منسابة فى أشكال منتظمة ذات أخاديد تجعلها أشبه بشكل المخ الحيوانى. وفى أوقات الأصيل العاصفة، حين تومض السماء بالبرق، تقف السحب على ارتفاع ثلاثين ميلا، ترشح الضوء أو تعكسه.

فى علم الفيزياء، من المقبول أن تعمل فى مجال اندماج الليزر، أو فى خصائص الجسيمات دون الذرية، أو فى البحث عن أصل الكون، أما مراقبة السحب فأمر لم يخطر على بال فيزيائى أن يضعه فى موضع البحث. لقد كان فايجنباوم يعمل، ربما على غير علم لأقرب معارفه، فى مشكلة غاية فى العمق، إنها "الهولوية".



وحيث تبدأ الهيولية، يتوقف العلم التقليدي. ذلك أنه منذ أن بدأ العلماء يبحثون عن القوانين التي تحكم الظواهر الفيزيائية في الكون، وهم يحجمون تماماً عن البحث في ظواهر الاضطرابات في الطبيعة الجوية، أو في التيارات المائية، أو في التقلبات في تعداد الكائنات الحية، أو في اضطرابات القلب أو المخ. إن الجانب غير المنضبط من الطبيعة، الجانب المتقلب والشاذ، كان يحير العلماء، أو بالأحرى يثير الفرع في قلوبهم.

على أنه في مطلع السبعينيات، عرف فريق من العلماء في الولايات المتحدة وأوروبا والاتحاد السوفيتي كيف يشقون طريقاً يسبرون به غور هذه الموضوعات. كانوا خليطاً من الفيزيائيين والكيميائيين والرياضيين والبيولوجيين وعلماء الاقتصاد، كل يبحث عن روابط تجمع بين الصور المختلفة من الاضطراب العشوائي. لقد وجد الأطباء منهم انضباطاً رائعاً في اضطرابات القلب العشوائية التي تسبب العديد من حالات الوفاة المفاجئة غير معروفة السبب، ودرس علماء البيئة التقلبات في تعداد أنواع من الحشرات. وغاص الاقتصاديون في بيانات البورصة لسنوات طويلة مضت للوصول إلى طريقة أفضل لتحليل تقلباتها. إن الأفكار الرائدة قد أدت إلى طريق أفضل لتصوير الطبيعة، السحب في تكوينها، البرق في وميضه، أوعية الدم الدقيقة في تشابكها، والمجرات في تراكمها.

حين بدأ فايجنباوم في التفكير في الهيولية في لوس ألاموس، كان واحداً من نفر من العلماء، غير معروفين في الغالب لبعضهم البعض. لقد كَوّن رياضي في باركلي Barkeley بكاليفورنيا فريقاً صغيراً للبحث في النظم الديناميكية بأسلوب مستحدث، وقام عالم في السكان بجامعة برينستون Princeton بنشر التماس مؤثر يدعو فيه العلماء إلى بحث السلوك المعقد والمدهش الكامن وراء بعض النماذج البسيطة، وكان باحث في الطبيعة الجوية يعمل في شركة آي.بي.إم عن كلمة يصف بها علمياً الأشكال التي تبدو غير هندسية، بما تضمنه من تعرجات والتواءات وانبعاجات وتهشّمات، وقام باحث فرنسي في مجال رياضيات الفيزياء بنشر مقال يتوقع فيه أن تكون الاضطرابات في التيارات المائية مرتبطة بشيء بسيط مجرد، يتكرر بصورة معينة بشكل لانهائي، أسماه "الجاذب الغريب strange attractor".

وبعد عقد من الزمان، أصبح لفظ الهيولية اختصاراً لاسم حركة علمية تخللت نسيج العلم في أعماقه. تعددت المؤتمرات وانتشرت المجالات التي تتحدث عن الهيولية. ورصدت الجهات الرسمية المتعددة، مثل تلك المسئولة عن الدفاع وعن الاستخبارات وعن الطاقة، أموالاً لهذه الدراسة وأنشأت الإدارات للإنفاق عليها. ولم تخل جامعة أو

مؤسسة علمية محترمة من قسم لدراسة الهولوية، وذهب الكثير من الباحثين إلى تدعيم أنفسهم بأصول هذا العلم الوليد، قبل أن يخوضوا في مجالهم التخصصي. وفي لوس ألاموس أنشئ "مركز الأبحاث غير الخطية" Center of Nonlinear Studies للتنسيق بين أصول علم الهولوية والأبحاث الجارية بالمعمل الوطني.

لقد ابتدع علم الهولوية تقنية خاصة به للتعامل مع الحاسوب، وأشكالا وصوراً تكمن بصورة مذهشة تحت ستار التعقيد، وأفرز العديد من المصطلحات للغة خاصة به، منها: towl- fractals, bifurcations, intermittencies, periodicities, folded, deffeomorphisms, smooth noodle maps الخ. وبالنسبة للكثير من العلماء، يُعتبر علم الهولوية علماً للعمليات أكثر منه علماً للحالات، يبحث في كيفية التكون لا في طبيعة الوجود^{III}.

وبعد أن أطلّ هذا العلم برأسه، أصبحت الهولوية تبدو جلية في كل شيء، في دخان السجائر حين يصعد في خط رأسي، ثم يستحيل دوائر متلاشية، وفي خفقان الرايات مع هبوب الريح، وفي تلاطم موجات الماء بعد أن كانت سيالاً منتظماً. إن الهولوية تبدو في تقلبات الطقس، وفي اهتزازات الطائرة حين طيرانها، وفي حركات السيارات حين تتزاحم على طريق سريع، وفي دفقات البترول حين يجري في أنابيبه تحت الأرض. فمهما كانت تصرفات الوسط الذي تتم دراسته، فهي تخضع لنفس الأنماط التحليلية التي يكشف عنها العلم الوليد. وقد غيرت هذه المفاهيم من نظرة رجال الأعمال لأسباب التقلبات الاقتصادية، ورجال الفلك وهم يرقبون الظواهر الكونية، ورجال السياسة وهم يحللون أسباب الأزمات التي تؤدي للنزاعات المسلحة.

لقد عبر علم الهولوية الحواجز بين العلوم المختلفة، فهو لكونه علماً وصفيّاً يتناول تحليل ظواهر الاضطرابات بصورة مجردة، قد ضم رجالاً من مجالات شاسعة التباين فيما بينها. وقد عبر أحد متخصصي الاقتصاد لمستمعيه ذات مرة عن ذلك قائلاً: "على مدى خمسين عاماً والعلم يقترب من أزمة الإغراق في التخصص، ولقد انقلب الأمر بصورة درامية بسبب علم الهولوية." إن هذا العلم يطرح قضايا لا قبل للطرق التقليدية للعلم بمواجهتها. فهو يتناول بالتحليل العميق ظاهرة التعقد في صورتها المجردة. لقد نظر رواد هذا العلم - على اختلاف تخصصاتهم - بحساسية مرهفة لاختلاف الأنماط patterns، خاصة ما تظهر منها على درجات متباينة من الدقة في نفس الوقت، فاكسبوا تنوعاً خاصاً للعشوائية والتعقد، للأحرف غير المستوية والطفرات المفاجئية. فالمؤمنون بالهولوية، كما يسمون أنفسهم، يثيرون الجدل حول قضايا مثل التحديدية^{IV} determinism والإرادة

الحرية والتطور وطبيعة العقل الواعي. إنهم يشعرون بأنهم يقلبون مسار العلم حين ينزع للنتجزيئية reductionism، أى لتحليل الظواهر إلى أسسها الأولية؛ الكواركات والكروموزومات والنيورونات، فهم ينظرون للظواهر نظرة شمولية.

وينظر لعلم الهيولية على أنه يُمثِّل ثالث ثورة علمية شهدتها القرن العشرون، بعد النظرية النسبية والنظرية الكمّية، وهو كمثلهما يتمرد على مبادئ العلم الفيزيائي كما أرساه نيوتن، فكما عبّر عنه أحد الفيزيائيين: "لقد أزال النسبية أوهايم نيوتن حول الفضاء والزمن كمفهومين مطلقين، وأزال الكمّية أحلامه حول التجارب قاطعة الدلالة، وأزال الهيولية أوهايم لابلاس حول قطعية التنبؤات". ومن بين الثورات الثلاث، تتناول الهيولية أشياء في متناول أيدينا، على مستوى الإدراك البشري الملموس. إن التجارب الحياتية والصور التي تقابل يومياً قد أضحت موضعاً للبحث والتمحيص. لقد ساد شعور منذ أمد - لم يعلن عنه صراحة - بأنه توجد فجوة تتزايد مع الأيام بين العلم والتصور الإنساني للطبيعة، وليس واضحاً الآن إن كان هذا الشعور على أساس صادق أم لا، ولكن الذين يرون أن العلم ينساق إلى مأزق يرون في علم الهيولية المخرج من هذا الوضع.

وفى ثانياً العلم ذاته، خرجت الهيولية من الأبواب الخلفية للعلم. لقد كان التيار الأساسي لعلم القرن العشرين هو فيزياء الطاقة العالية، حيث يتم استكشاف المزيد من الجسيمات الأولية التي تزداد ضآلة في الكتلة، على مستويات متزايدة من الطاقة، وفترات من الزمن تزداد تناقصاً مع الأيام. ومن هذا التيار ظهرت نظريات عن القوى الأساسية للطبيعة، وعن نشأة الكون، على أن الشعور بعدم الرضا بدأ ينتاب بعض العلماء الشبان. فقد أخذ التيار يبطئ من سرعته، ووجدوا في علم الهيولية الوليد الأمل في تعديل المسار للفيزياء في مجموعها.

فمع ثورة الهيولية وجد العلماء أنفسهم يعودون دونما حرج إلى قضايا على مستوى الحياة اليومية، بجوار دراسة المجرات تكون دراسة السحب، وتجرى أبحاثهم على أجهزة للحاسوب الشخصي بدلاً من الأجهزة فائقة القدرة، وتضم المجلات العلمية المتخصصة بجوار مقال عن النظرية الكمّية مقالاً عن الكرة النطاطة. إن النظم البسيطة قد أظهرت مشاكل عويصة في قضية التنبؤ، ولكن نظاماً قد أطل برأسه من بين عشوائية تلك النظم، عشوائية محكومة بالنظام! إن علماً جديداً بدأ يصل الفجوة السحيقة بين ما تفعله الطبيعة على مستوى الوحدات؛ جزيء من الماء أو خلية في نسيج القلب، وبين ما تفعله الملايين من هذه الجزيئات أو الخلايا في مجموعها.

انظر إلى بقعتين من الزيد في قاع بئر تنحدر المياه فيه، وحاول أن تتساءل عن البعد بينهما حين كانا عند السطح. ليس من سبيل للإجابة، من وجهة نظر العلم التقليدي. فكأن الله سبحانه هو الذي تولى خلط هذه الجزيئات بقدرته الخفية. لقد جرت العادة حين رؤية ظاهرة معقدة، أن يُعتقد أن وراءها أسباباً معقدة. وحين يتلاحظ وجود صلة عشوائية بين المدخلات والمخرجات لنظام ما، يُظن على التو أن الأمر متروك لصدفة لا نظام لها، أو على أن السبب هو تداخل من شوشرة خارجية قوية في النظام الأولي. وقد نبعت الدراسة الحديثة للهيولية من تزايد إحساس منذ بداية الستينات بأنه من الممكن بمعادلات بسيطة نمذجة نظم يُظن فيها الفوضوية، كتدفق عنيف لمياه شلال. فالاختلافات الضئيلة في المدخلات يتولد عنها اختلافات ضخمة في المخرجات، وهي ظاهرة يطلق عليها "الحساسية للظروف الأولية" sensitivity to initial conditions وفي مجال الطبيعة الجوية، يُطلق على هذه الظاهرة تندرا "ظاهرة الفراشة butterfly effect"، ومفادها أن رفرفة فراشة بجناحيها في بكين يمكن أن يتولد عنها بعد عدة أسابيع عاصفة جوية في نيويورك.

وحين يعود علماء الهيولية بذاكرتهم إلى منشأ هذا العلم، يجدون الكثير من رواسب الماضي، على أن شيئاً واحداً يبدو مؤكداً، لقد كانت ظاهرة الفراشة هي نقطة البداية.

-
- i كان ذلك لإنتاج القنبلة الذرية-المترجم
 - ii جمع "quanta" وهو الاصطلاح الذي يطلق على أقل مقدار غير قابل للتجزئة من الوحدات الأساسية، كالطاقة والزمن والكتلة، طبقاً لمفهوم النظرية الكمية-المراجع
 - iii بعض هذه المصطلحات سوف تعرض تفصيلاً في ثنايا الكتاب، وبعضها خارج عن نطاقه-المترجم
 - iv يقصد بذلك أن للأشياء قيماً محددة، وهو ما رفضته نظرية الكم متمثلاً ذلك في مبدأ عدم اليقين، ففي عالم ما دون الذرة ليس لك أن تأمل في الحصول على قيم حاسمة كموضع إلكترون بالذات في وقت محدد، بل الأمور كلها احتمالية، وننوه إلى أن كلمة determinism هنا تأخذ معنى يختلف عن "الحتمية" والتي تعنى التسليم بالقضاء والقدر، فالمجالان مختلفان كلية. -المترجم

ظاهرة الفراشة

سطعت الشمس في سماء لم تعرف السحب، وهبت الريح على أرض ملساء كالزجاج. لم يكن المساء يأتي على الإطلاق، ولا يتحول الخريف إلى شتاء، والمطر لم يحدث أن انهمر. كان تحول الطقس في برنامج محاكاة simulation الطقس على شاشة حاسوب "إدوارد لورنز Edward Lorenz" يتغير ببطء ولكن بثقة، عبر طقس جاف في قيلولة يوم من أيام منتصف العام، كما لو كان العالم قد تحول إلى هذه المدينة الخيالية، أقرب إلى صورة مبسطة لجو جنوب كاليفورنيا.

كان لورنز يراقب الطقس الحقيقي خلال نافذة حجرته؛ الضباب في مطلع النهار يزحف على مباني معهد ماساشوسيتس للتكنولوجيا Massachusetts Institute of Technology (M. I. T)، أو السحب المنخفضة تنساب آتية من الأطلنطي. ولم يكن شيء كالضباب أو السحب ممثلاً على حاسوبه من طراز Royal McBee، هذه الآلة العتيقة المكونة من تكديس هائل من التوصيلات والصمامات الإلكترونية المفرغة، والتي تشغل قدراً لا بأس به من غرفة مكتبه، تصدر ضوضاء وحرارة مثيرين للأعصاب، ولا يمر أسبوع أو اثنان إلا وهي معطلة لسبب أو لآخر. لم يكن لها لا من الذاكرة ولا من السرعة ما يتيح تمثيل الطقس الحقيقي. ومع ذلك فقد نجح لورنز في عام ١٩٦٠ في تصميم لعبة طقس أدهشت أقرانه آنذاك. وبين الحين والآخر كانت الآلة تسجل مرور يوم عن طريق إخراج صفوف عديدة من الأرقام، إذا كان بإمكانك أن تفسرها، شعرت بالرياح وهي تهب آتية من الشرق متجهة إلى الشمال، ثم إلى الجنوب، ثم إلى الشمال مرة أخرى، والدوامات الهوائية المرُمزة بالنظام الرقمي الثنائي تزحف بطيئة على الكرة الأرضية النموذجية. ويكلمة تنتشر في القسم، يأتي العاملون في مجال الطبيعة الجوية مع تلاميذهم يتراهنون عما سيكون عليه طقس لورنز في الإخراج التالي للحاسوب. بصورة ما، لم يكن نفس الشيء يتكرر مرتين أبداً.

كان لورنز يعشق الطقس، وهو مطلب جوهري لمن أراد أن يعمل في مجال الطبيعة الجوية. لقد استمتع بما فيه من تحدٍ، وأبدى إعجاباً بأنماطه التي تأتي وتروح مع

تقلبه، مجموعات من الدوامات والأعاصير، تخضع دائماً للمعادلات الرياضية، ولكن أبداً لا تكرر نفسها. كان حين ينظر للسحب يخيل إليه أنها تتضمن هيكلاً ما. لقد ظن ذات يوم أن دراسة الطقس أشبه بدراسة صندوق مسحور، والآن يتساءل إذا كان بمقدور العلم أن يسبر غور هذا الصندوق. لقد كان للطقس لديه مذاق لا يكفي التعبير عنه بمجرد المتوسطات، درجة الحرارة المتوسطة في بلدة كذا، أو متوسط هطول الأمطار في مدينة كذا، فكل هذه إحصاءات، أما المضمون فكامن في الأنماط التي يتشكل بها الهواء الجوى مع الأوقات، والتي سَجَّلَهَا على حاسوبه.

كان هو السيد المطاع على الكون الممثل على جهازه، يضع له ما يشاء من قوانين. بعد فترة من التجربة والخطأ، اختار اثني عشر من القوانين الرقمية التي تربط بين درجة الحرارة والضغط، وبين الضغط وسرعة الرياح. كان يدرك أنه يُطَبِّق قوانين نيوتن للحركة، وهي قوانين تتصور الكون كساعة منضبطة، ما أن يبدأ عمله حتى يستمر على نفس النمط إلى الأبد دونما حاجة لتدخل خارجي. كانت هذه هي الفلسفة التي بنى عليها نموذج الطقس على الحاسوب.

كان لورنز طرازاً غريباً بين المشتغلين بالطبيعة الجوية، يحمل وجه مزارع من الغرب الأمريكي، ذى عينين تجعلانه يبدو ضاحكاً حتى لو لم يكن كذلك، ضنينا في الحديث عن نفسه أو عن عمله، مفضلاً أن يكون هو المستمع. كثيراً ما كان يفرق نفسه في حسابات أو أحلام يجدها أقرانه مستحيلة، وكان أقرب أصدقائه يشعرون بأنه يقضى أغلب وقته سابحاً في فضاء بعيد.

كان في صباه مُغرماً بتتبع درجات الحرارة، ولكنه كان أيضاً مغرماً بكتب العضلات الرياضية. وكثيراً ما كان يشاركه والده في حلها. وحين كان يبدو أن معضلة ما مستعصية على الحل، كان والده يطمئنه أن هذا أمر وارد، فمن الممكن أن تتم البرهنة على أن مسألة ما لا حل لها. وحين تخرج عام ١٩٢٨ وجد في نفسه ميلاً شديداً للرياضيات، إلا أن الرياح أتت بغير ذلك، فخلال الحرب العالمية الثانية أُسند إليه عمل التنبؤ بالطقس لخدمة القوات الجوية. وبعد الحرب قرّر أن يظل في نفس المجال، دارساً نظرياته، مدعماً إياه بشيء من الرياضيات. وقد اكتسب شهرة بنشر بعض المقالات عن موضوعات تقليدية، مثل حركة دوران الهواء الجوي، ولكنه في نفس الوقت ظل يفكر في مسألة التنبؤ الجوى.

وقد كان موضوع التنبؤ بالنسبة للجاذبين من العاملين في الطبيعة الجوية أقل من أن يُعتبر علماً. إنه عمل يقوم به الفنيون، يعتمد أساساً على التخمين، أما المراكز

البحثية فتفضل الموضوعات التي تفضي إلى حل ملموس. كان لورنز عالماً بغموض عملية التنبؤ، وقد مارسه هو نفسه خلال الحرب، ولكنه كان يُكنّ له اهتماماً من نوع خاص، اهتماماً ذا نزعة رياضية.

ولم يقف الأمر لدى أغلب علماء الستينات عند احتقار التنبؤ بالطقس، بل تعداه إلى عدم الثقة في أجهزة الحاسوب. فهذه الحاسبات المعقدة لم تكن تشبه الأجهزة المتطورة المستخدمة في التجارب العلمية في شيء. وعلى ذلك فقد كانت مسألة النمذجة الرقمية للطقس شيئاً مقبلاً، ولكنه أمر قد أن أوانه في حقيقة الأمر، فقد قُدِّرُ للتنبؤ بالطقس أن ينتظر قرنين من الزمان إلى أن تظهر تلك الآلات التي تستطيع تكرار العمليات الحسابية لآلاف المرات دون كلل في لمح البصر، وبقدرة لم يتصورها عقل من قبل. فالحاسوب وحده هو القادر على أن يحقق وعد نيوتن بأن الكون يسير على قواعد محددة، فما حققه علماء الفلك بالحساب البسيط يمكن لعلماء الطبيعة الجوية تحقيقه بواسطة الحاسوب، أن يعرفوا المستقبل بناء على معرفة الظروف الأولية والقواعد العلمية. فالقوانين التي تحكم حركة الهواء والماء معروفة تماماً، كما هو الحال بالنسبة للقوانين التي تحكم حركة الكواكب. وعلماء الفلك لم يصلوا للكمال المطلق في هذا الكون السحيق المعقد، ولن يفعلوا، على أن حساباتهم كانت من الدقة العملية لدرجة أن الناس قبلوها كحقائق راسخة. فحين يقول الفلكي إن مُذنباً معيناً سوف يعود للظهور بعد كذا من السنوات، يؤخذ ذلك على أنه حقيقة علمية وليس تنبؤاً. إن تنبؤات علم الفلك تحدد المسارات الدقيقة لأجرام السماء، فلماذا لا يفعل علم الطبيعة الجوية نفس الشيء للرياح والسحب؟

إن الطقس أمر معقد، ولكنه من حيث المبدأ يخضع لنفس القوانين. لعل حاسوباً ذا قدرة كافية يحقق تخيل لابلاس¹ -وهو الذي اعتنق فلسفة نيوتن التحديدية كما لم يفعل أحد غيره - للعقل الفائق، والذي يتصوره قادراً على استيعاب كافة القوانين، بما يُمكنه من القيام بعمليات التنبؤ لكافة الظواهر الفيزيائية بدقة مطلقة. بالطبع تزعج النظرية الكمومية في أيامنا -بما تضمنته من مبدأ عدم اليقين² uncertainty principle" بهذا الحلم، ولكن يبدو أن الحاسوب قد جدد في أذهان كثير من العلماء بالنسبة لمجالات تخصصاتهم، كعلماء البيولوجيا والاقتصاد والأطباء العقلين. إنهم يحاولون تحليل الكون الذي يتعاملون معه إلى آخر ذرة فيه، ليخضعوها لقواعدهم العلمية. في كل هذه العلوم، سيطرت روح نيوتن التحديدية على أذهان علمائها، وقد اختلطت فكرة التنبؤ مع فكرة الحوسبة منذ أن فكر جون فون نيومان³ John von Neumann في

وضع التصميم المبدئي للحاسوب بشكله الحديث في معهد الدراسات المتقدمة Institute of Advanced Study بـبرتسنون Princeton بنيوجيرسى فى مطلع الخمسينات. كان فون نيومان يدرك أن نمذجة الطقس مجال مثالى للتطبيق للحاسوب.

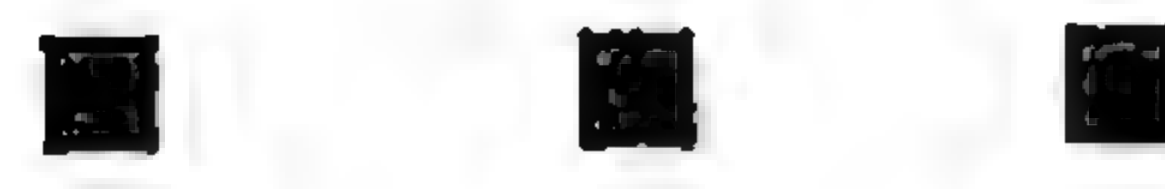
كانت هناك على الدوام ثغرة طفيفة فى عمل العلماء، تقبع منزوية كدين لم يسدد. إن القياسات العملية لا يمكن أبدا أن تكون دقيقة بصورة تامة. كان العلماء المنصوون تحت لواء نيوتن يرفعون على الدوام راية أخرى مفادها شيء من هذا القبيل: "إذا ما أعطينا الظروف المبدئية التقريبية لنظام ما، والقوانين التى تحكمه، يمكننا أن نتوصل دائما إلى نتائج تقريبية". وقد عبر أحد العلماء عن هذا المبدأ بالمثال التالي: "إذا كنت تحسب حركة كرة بلياردو، ليس لك أن تأخذ فى الاعتبار سقوط صخرة على كوكب فى أحد المجرات البعيدة، فالمؤثرات الطفيفة يمكن على الدوام إهمالها. إن التقارب^{١٧} convergence هو سمة اتجاه التصرفات، وليس لمؤثر طفيف أن يدمر هذا التقارب". فمن وجهة النظر التقليدية، فإن مفهوى التقريب approximation والتقارب أمران مبرران تماما. ونجحت هذه الفكرة تقريبا، فإن خطأ طفيفا فى قياسات مسار المذنب هالى عام ١٩١٠ قد أدت إلى خطأ طفيف فى حساب موعد ظهوره عام ١٩٨٦، وسيظل هذا الخطأ عالقا للملايين السنين الآتية. ويعتمد الحاسوب على نفس الفكرة فى توجيه مسار مركبات الفضاء، والاقتصاديون فى تنبؤاتهم بحركة البورصة (بدرجة أقل من النجاح)، وهو ما فعله الرواد الأوائل فى مجال التنبؤ بالطقس.

فعن طريق حاسوبه البدائي، بسط لورنز الطقس إلى هيكله الأولي، ومع ذلك فقد كانت الرياح فى مخرجات حاسوبه تتصرف تماما كما تفعل الرياح الطبيعية على الأرض. لقد وافقت فكرته المحببة عن الطقس، إنه يكرر نفسه فى أنماط مألوفة على مر الأوقات، الضغط يرتفع وينخفض، والرياح تتحول من الجنوب للشمال. ولكن التكرار لا يكون متطابقا بالضبط، لقد كان تكراراً للأنماط، ولكن مع وجود الاختلافات بها، عدم انتظام منضبط.

ولتوضيح الرؤية أكثر، ابتدع لورنز نظاما رسوميا بدائيا، فبدلا من إخراج الأسطر من الأرقام، جعل الحاسوب يخرج أشكالا بيانية من الحرف "a"، تترنح بين قمم ووديان مع دوران ورقة التسجيل، تمثل حركة الرياح عبر عالمه الوهمي. كانت هناك دورات تتكرر، ولكن دون أن تتطابق دورتان أبدا. بدا النظام وكأنه يخرج أسرارهِ شيئا فشيئا أمام نظر المتنبئ.

و ذات يوم من أيام شتاء عام ١٩٦١، أراد لورنز اختبار دورة بتفصيل أكثر، وبدلاً من أن يبدأها من البداية، اختصر الطريق بأن وضع الظروف الأولية التي استخدمها كمدخلات للإخراج السابق مباشرة. ثم غادر الحجرة ليريح نفسه من ضوضاء الآلة وحرارتها، ويمتّع نفسه بفنجان من القهوة ريّثاً يتم الحاسوب عمله. وحين عاد بعد قرابة الساعة، رأى شيئاً غير متوقع.

شيئاً يحمل فى طياته بذرة لميلاد علم جديد!

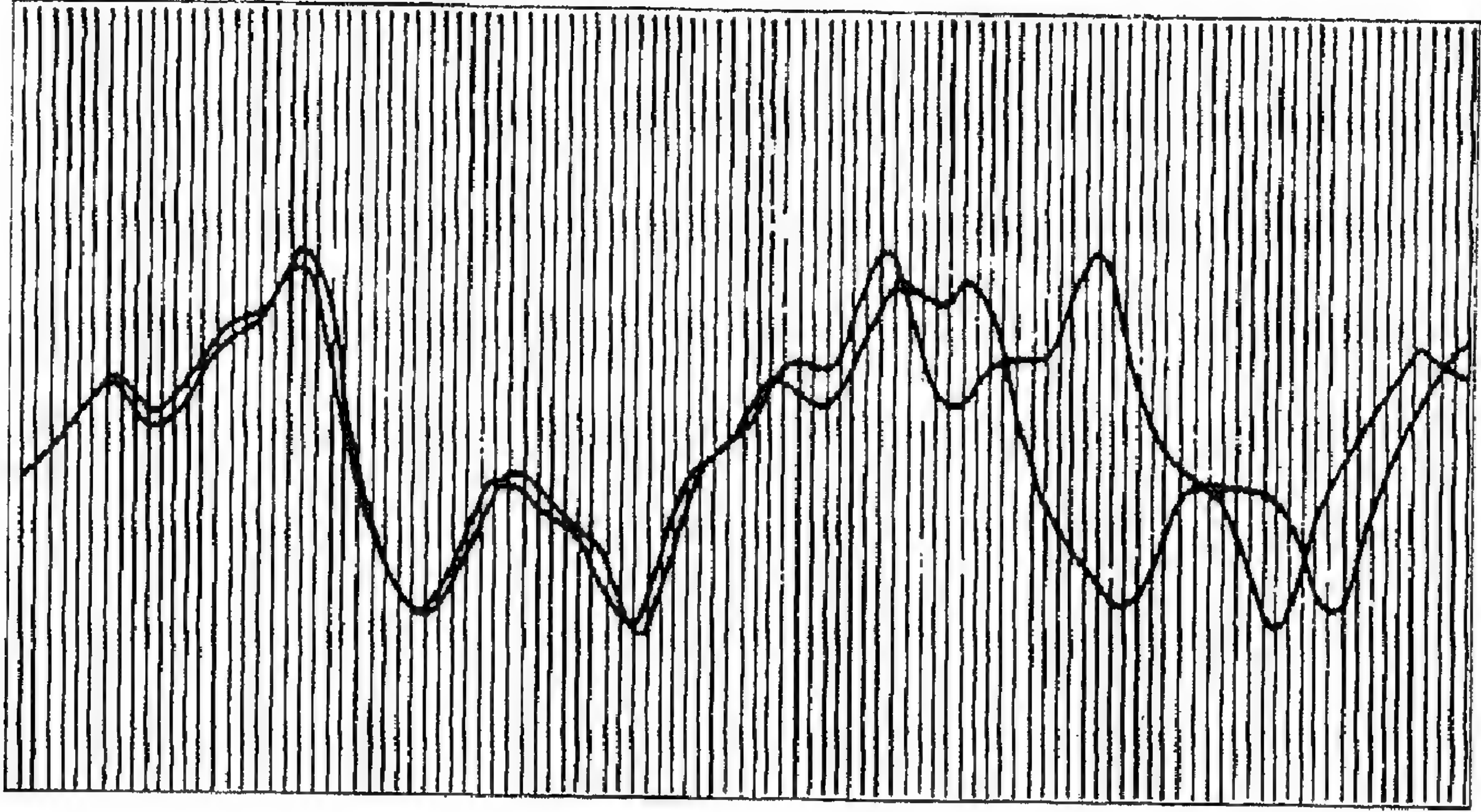


كان المفروض أن تكون المخرجات فى الدورة الجديدة متطابقة مع الدورة السابقة. لقد أدخل لورنز البيانات بنفسه. والبرنامج لم يتغير. ولكن تصرف الطقس أمام عينيه كان مختلفاً بالمرّة، ففي غضون فترة بسيطة انمحي التشابه بين الدورتين تماماً. لقد كانت أول خاطرة فى ذهنه أن عطلاً آخر قد ألم بالجهاز.

وفجأة أدرك الحقيقة، ليس بالجهاز أى عيب، فالمشكلة كانت فى الأرقام التى أدخلها. إن الأرقام كانت تخزن فى ذاكرة الحاسوب لستة أرقام عشرية، ولكنه قريباً لثلاثة أرقام فقط، توفيراً للمساحة. إن تقريباً يتناول الرقم ابتداءً من الرابع العشري، أى جزء من الألف، يوحى بأن الأثر لن يكون ذا بال بالمرّة.

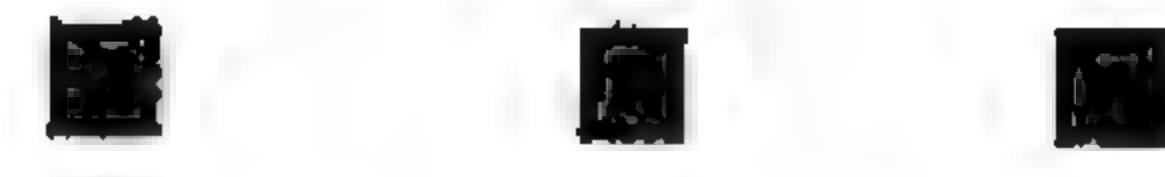
كان افتراضاً معقولاً، فلو أن قمراً صناعياً استطاع قياس درجة حرارة المحيط لجزء من الألف من الدرجة، لكان هذا حسن حظ فريد فى نوعه. ومن المنطقى أن يتسبب الحيود الطفيف فى المدخلات فى حيود طفيف فى التشابه بين الدورتين. إن الفرق لا يزيد تمثيله عن نفخة من الهواء، من المفروض أن تزدوى على التو دون أن تترك أى أثر على النمط العام للطقس. على أن البادى من مخرجات الحاسوب أن فرقاً كهذا قد تسبب فى أثر غاية فى الخطر.

وأخرج لورنز مخرجات الدورتين على ورق شفاف، ووضع الشكّلين فوق بعضهما ليرى كيف يجرى التغير بينهما. فى البداية تطابقت أول قمتين، ثم تلا ذلك فرق بحجم شعرة، وعند حدوث القمة التالية، كان الفرق بين القمتين واضحاً، وعند القمة الثالثة فالرابعة، تلاشى التشابه تماماً. فى هذا اليوم، أدرك لورنز أن التنبؤ طويل الأجل للطقس لن يكون مكلاً بالنجاح على الإطلاق.



شكل ١ - ١ كيف يتباعد نمطان للطقس: من نفس النقطة تقريبا، رأى إدوارد لورنز الطقس الذي بناه على حاسوبه يخرج أنماطا تتباعد عن بعضها البعض بالتدريج حتى يُفقد أى تماثل بينها.

وقد عبّر عن ذلك قائلا: "لقد كنا دائما غير قادرين على التنبؤ بالطقس بصفة قاطعة، واليوم بدا عذرنا. فالشخص العادي الذي يرانا نتنبأ بقدر معقول من الدقة بالمدّ في البحار إلى عدة أشهر تالية يتساءل لماذا لا نفعل نفس الشيء مع الطقس إن الأمر لا يعدو اختلافا في الوسط، أما القوانين فمتشابهة. لقد أدركت أن النظم التي لا تتسم بالدورية يستحيل أن تكون مجالا للتنبؤ طويل الأمد."



لقد اجتاحت فترة الخمسينات والستينات موجة غير صحيحة من التفاؤل بالنسبة للتنبؤ الجوي. وقد امتلأت الصحف والمجلات بمقالات لا تبشر فقط بدقة في التنبؤ به، بل بالتحكم والتعديل فيه. إن تقنيتين كانتا تنضجان معا، الحاسبات الرقمية، والأقمار الصناعية. وكان الإعداد قائما لبرنامج يستغل إمكاناتهما معا؛ "برنامج دراسات الطقس للكرة الأرضية". كان الشعور سائدا بأن الجنس البشري قد أصبح على وشك أن يكون سيد الطقس لا ضحيته. سوف تغطي القباب المزارع، وستقوم الطائرات بتلقيح السحب، وسوف يتعلم العلماء كيف يسقطون المطر وكيف يوقفونه.

كان الأب الروحي لهذه الموجة هو نفسه فون نيومان، والذي صمم حاسوبه بهذه النية بالذات: التحكم في الطقس، من بين أهداف أخرى بطبيعة الحال، فأحاط نفسه بالعلماء في الطبيعة الجوية، وألقى كلمات في محافل علمية عن خطته في هذا المجال. كان لديه مبرر رياضي لهذا الإغراق في التفاؤل، لقد كان يدرك أن أى نظام ديناميكي لا بد وأن له نقطة اختلال في التوازن، حيث تتسبب تأثيرات طفيفة في نتائج ضخمة، كوضع كرة متوازنة على قمة حادة، إلا أنه كان يأمل في مواجهة مثل هذه الأوضاع بقوة حاسوبه، ولكن التوفيق خاضه في إدراك ظاهرة الهولوية، حيث تسود حالة عدم التوازن جميع نقاط النظام.

وبحلول الثمانينات كانت الجهودات لتنفيذ أمل فون نيومان فيما يختص بالجانب التنبؤي للطقس تجرى على قدم وساق، فقد أنشئت الإدارات الضخمة ذات الميزانيات الوافرة، وتمثلت الريادة في ذلك في الولايات المتحدة في مبنى بماريلاند، مجهز بشبكة رادارية وراديوية على سطحه، وحاسوب عملاق لا يشبه حاسوب لورنز إلا في نظرية العمل. فبينما كان الأخير يجرى ستين عملية ضرب في الثانية، كان الأول، من طراز C.D.C.205 ينفذ عدة ملايين عملية في الثانية، وبينما كان لورنز سعيدا بحل اثنتي عشرة معادلة معا، كان الحاسوب الجديد يستطيع التعامل مع نموذج مكون من عدة آلاف منها. كان النموذج يفهم طريقة تحريك الرطوبة للحرارة في الهواء حين تكثفها وحين تبخرها، وكانت الرياح الرقمية تشكلها جبال رقمية، وكانت البيانات تصب في النظام من كافة أرجاء المعمورة، من طائرات وأقمار صناعية وسفن، كان المركز القومي للأرصاد الجوية The National Meteorological Center ثاني أقوى مركز للتنبؤ في العالم.

أما الأول في هذا المضمار فقد كان في ريدينج بإنجلترا، على مسافة ساعة بالسيارة من لندن، وهو المركز الأوربي للتنبؤ متوسط المدى للطقس The European Center for Medium Range Weather Forecasts، يشغل مبنى متواضعا على طراز مبنى الأمم المتحدة، مزينا بالهدايا من كافة الأقطار، بنى بنشوة روح السوق الأوروبية المشتركة آنذاك. في هذا المبنى قررت الدول الأوروبية المساهمة أن تحشد أفضل خبرتها العلمية في عملية التنبؤ بالطقس. وقد عزا الأوروبيون نجاحهم إلى فريق العمل غير الحكومي الذي تولى تنفيذ المشروع، وإلى حاسوبهم فائق القدرة من طراز Cray والذي كان دائما يسبق قرينه الأمريكي بخطوة.

وقد كان التنبؤ بالطقس بداية لعملية نمذجة النظم المعقدة حاسوبيا، ولكنه لم يكن النهاية. فقد خدمت هذه التقنية العديد من النظم العلمية التي كانت تنشد التنبؤ بكل

شيء، بدءاً من تصرف كمية قليلة من سائل إلى تصميم الرفافات إلى التنبؤ بالتقلبات الاقتصادية. فبالفعل تشابه التحليل الاقتصادي في السبعينات والثمانينات مع النظم العلمية الأخرى في استخدامه للحاسوب. فالنماذج الموضوعة تقوم على تعامل الحاسوب مع كمية ضخمة من المعادلات التي تحكم الظاهرة النمذجة، على أساس من كم من البيانات والقياسات لدرجات حرارة أو لتدفق نقدي، للوصول إلى توقع مستقبلي. وقد كان المبرمجون يأملون ألا تفسد النتائج نتيجة بعض التبسيطات الحتمية التي تقتضيها عملية النمذجة خلال البرمجة. فإذا ما أخرج الحاسوب نتائج واضحة الشذوذ، كأن أغرق صحراء في فيضان أو أعطى معدل الفائدة تضاعفا ثلاثي القوة، فإنهم يعودون لمراجعة معادلاتهم لجعل نتائج التنبؤ أقرب للمنطق.

كانت النماذج الحاسوبية للنظم الاقتصادية تبدو بالنسبة للتنبؤ غير موفقة بالقدر المرضي، ولكن مع ذلك فقد كانت الحكومات والمؤسسات تأخذ بها، ربما بسبب الاضطرار أو الافتقاد لشيء أفضل. ولعلمهم كانوا يدركون أن تمثيل عامل كأذواق المستهلكين ليس بالأمر الهين مثل تمثيل نسبة الرطوبة الجوية، وأنه لم توضع بعد معادلات دقيقة للتقلبات السياسية أو التغير في الأذواق. ولكن القليل هم من تنبهوا لضعف فلسفة النمذجة الحاسوبية ذاتها، حتى مع وفرة البيانات ودقة المعادلات، كما في حالة التنبؤ بالطقس.

لقد أدت النمذجة بالفعل إلى تحويل عملية التنبؤ بالطقس من مقدرة شخصية إلى علم، وقد قدر المركز الأوربي للتنبؤ أنه قد حدثت وفورات تقدر بـ 100 بليون دولار سنوياً بسبب التحسن في عملية التنبؤ. ولكن التنبؤ لأكثر من يومين أو ثلاثة كان أمراً مشكوكاً في صحته، ولأكثر من ذلك لا يعتد به على الإطلاق.

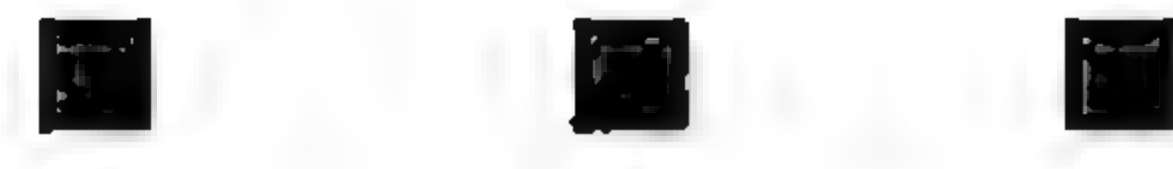
كان السبب هو ظاهرة الفراشة butterfly effect. فعند تأثير طفيف، وهو ما يعنى لدى رجال الأرصاد صاعقة رعدية مثلاً، فإن التنبؤ ينهار سريعاً، حيث تتضاعف الأخطاء والشكوك، متضاعفة بصورة شديدة الاضطراب.

إن شبكة الرصد الحالية تعمل عن طريق مجسات متناثرة على أبعاد ستين ميلاً بين المجس والآخر، ومع ذلك فإن بعضاً من التخمين لا بد منه، حيث لا يمكن للمحطات الأرضية أو الأقمار الصناعية أن ترى كل شيء. ولكن هب أن المجسات قد غطت الكرة الأرضية على بعد قدم واحد من بعضها، مرتفعة على مسافات قدم واحد إلى أعلى الفضاء الجوي، وأن كل مجس يعطي كافة البيانات بدقة كاملة من حرارة إلى رطوبة إلى ضغط جوى، إلى أى عامل يتطلبه الرصد، وأن البيانات تدخل إلى حاسوب فائق

القدرة دقيقة بعد أخرى. إنه رغم ذلك لن يمكنه أن يحدد ما سيكون عليه الحال بعد شهر من الزمان في مكان ما. ففيما بين الدقيقة الأخرى، تحدث تغيرات لن يشعر بها الحاسوب، تحيد بصورة طفيفة عن المتوسط. وفي الدقيقة التالية سيكون التغير على بعد القدم التالي شيئاً ملموساً، ثم سرعان ما يتضاعف الخطأ عند عشرة أقدام، وهكذا إلى مدى الكرة الأرضية.

لقد أخبر لورنز أحد أصدقائه عن ظاهرة الفراشة، وما أحس به بالنسبة للتنبؤ طويل المدى، فأجابه الصديق أنه بالنسبة للتنبؤ فلا، أما بالنسبة للتحكم فنعم. لقد كانت إجابة فون نيومان من قبل. لقد كان يظن أن تعديلاً طفيفاً يمكن أن يؤدي إلى تغيرات محسوسة.

ولكن لورنز رأى الأمر مختلفاً. نعم، يمكننا أن نغير في الطقس، ولكن ما أن نفعل ذلك، حتى نفقد القدرة على تحديد ما كان سيصير إليه الحال لو لم نتدخل. إن الأمر أشبه بعملية خلط إضافية لأوراق لعب مخلوطة بالفعل، تعلم أنها سوف تؤثر على حظك، ولكنك لا تعلم هل للأحسن أم للأسوأ.



كان اكتشاف لورنز مفاجأة أشبه بما حدث من قبل لأرشميدس، ولكنه لم يكن بالرجل الذي يجرى مهلاً "وجدتها"، وبدلاً من ذلك اتجه إلى فهم مضمون ما اكتشفه، وما يعنيه فهم **التدفقات flow** مهما كان مجالها العلمي.

لو أن لورنز اكتفى بظاهرة الفراشة، لكان كل ما عمله هو مجرد نقل أخبار سيئة، ولكنه قد رأى شيئاً أكثر من العشوائية كامناً في أعماق نموذج الطقس. لقد رأى هيكلاً هندسياً دقيقاً، انضباطاً متكرراً في صورة عشوائية. لقد كان هو في الأصل عالماً رياضياً في ملابس رجل طبيعة جوية، وقد آن الأوان يلعب الدورين معاً. فليكتب أبحاثاً في علم الطبيعة الجوية، ولكن ليكتب أيضاً أبحاثاً رياضية تحت غلالة من ذلك العلم. وبعد حين، اختفت هذه الغلالة تماماً.

لقد أخذ اتجاهه يتحول أكثر فأكثر إلى رياضيات النظم التي لا تعرف حالة الاستقرار، تلك التي تكرر نفسها تقريباً، ولكن لا تفلح أبداً في أن يكون التكرار متطابقاً. كل الناس يعلمون أن الطقس من قبيل ذلك، نظام لا دوري aperiodic. والطبيعة مليئة بمثله، الكائنات التي يرتفع تعدادها وينخفض بصورة شبه دورية،

الأوبئة التي تظهر وتختفي في مواعيد مراوغة شبه منتظمة. لو قدر للطقس أن يكرر نفسه مرة واحدة بصورة تامة، كل هبة ريح وقطرة مطر، لكرر نفسه بهذا الشكل للأبد، ولزالت مشكلة التنبؤ تماما.

أدرك لورنز أنه لا بد من وجود رابطة بين عدم الدورية وعدم القابلية للتنبؤ. لم يكن من السهل وضع معادلة تضم اللادورية التي ينشدها، فقد كان حاسوبه يميل دائما إلى التقيد بدورية معينة، ولكن لورنز أخذ يجرب بعض التعقيدات الطفيفة، إلى أن نجح أخير في تضمين معادلاته المتغيرة كمية الحرارة التي تسرى من الشرق للغرب، لتمثيل الطريقة الحقيقية التي بها تسخن الشمس الجانبين الشرقي والغربي للقارة الأمريكية. لقد اختفت الدورية.

لم تكن ظاهرة الفراشة صدفه عارضة، لقد كانت أمرا ضرورياً. لقد تدبر لورنز الأمر؛ لنفرض أن الاضطرابات الطفيفة ظل تأثيرها طفيفا، ولم يتصاعد إلى نتائج جوهريّة، عندئذ لو أن الطقس اقترب من حالة كان قد مرّ بها سابقا، لكرر نفس النمط بطريقة تقريبية، ولخلت الدنيا من هذا الثراء في التنوع في أنماط الطقس الذي نراه في الواقع. فللتمتع بهذا الثراء وما يصاحبه من جمال كوني، لا بد من شيء كظاهرة الفراشة.

وكان لا بد من وضع اسم علمي لظاهرة الفراشة، فكان ذلك: "الحساسية المرفهة للظروف الأولية"، وهو مفهوم ليس بغريب على البشرية، وللنظر إلى الأغنية الشعبية التالية:

For loss of a nail, the shoe was lost;
For loss of a shoe, the horse was lost;
For loss of a horse, the rider was lost;
For loss of a rider, the battle was lost;
For loss of a battle, the kingdom was lost!"

ولنحاول ترجمتها على النحو التالي:

ضاعت الحدوة حين المسمار ضاع.
ولضياع الحدوة، الحصان ضاع.
فضاع الفارس حين الحصان ضاع.
فخسرت المعركة حين الفارس ضاع.
وبخسارة المعركة، الوطن ضاع!

فى العلم كما فى الحياة، من المعلوم أن سلسلة من الحوادث قد تتفاقم إلى نقطة تعظم من آثار الحوادث التافهة. ولكن الهيولية تعنى أن هذه النقطة هى الشائعة فى كل مكان من النظام، ففى نظام كالطقس، تكون الحساسية للظروف الأولية أمرا لا مناص منه بناء على الأسلوب الذى تتشابك فيه النطاقات الضئيلة مع الكبيرة.

وتملك رفقاء لورنز العجب حين رأوا كيف مثل كلاً من اللادورية والحساسية للظروف الأولية فى النسخة المعدلة من طقسه، اثنى عشرة معادلة، يعاد حسابها مرة تلو الأخرى بقدرة لا تعرف الكلل، كيف يمكن لكل هذا الثراء، هذه اللاتنبئية، هذه الهيولية، أن تنبع من نظام تحديدي بسيط؟



وضع لورنز الطقس جانبا، ويبحث عن نظام أكثر بساطة لإنتاج التصرفات المعقدة، ووجد ضالته فى نظام يعبر عنه بثلاث معادلات لا غير. كانت معادلات لاختية، بمعنى أنها تعبر عن متغيرات ليست متناسبة تماما. فالمعادلات الختية يمكن التعبير عنها بخط مستقيم، وهى سهلة الاستيعاب، كلما زاد متغير زاد الآخر بنفس النسبة. وهى بذلك قابلة للحل، مما يجعلها المفضلة فى المراجع، كما أن لها فضيلة تحمد لها، يمكنك جمع الكميات، وضمها لبعضها البعض.

والنظم الختية غير قابلة للحل بوجه عام، ولا تقبل الجمع للكميات التى تتعامل معها. ففى النظم الميكانيكية، ونظم الموائع، يكون الجانب اللاختى من النظام هو الجانب الذى يتم إهماله من الدراسة لإمكان فهم النظام. لنأخذ الاحتكاك مثلاً، فبدونه يمكن ربط العلاقة بين الطاقة التى تعطى لجسم وما يكتسبه من سرعة بمعادلة بسيطة يسهل استيعابها، ولكن مع الاحتكاك تتعقد الظاهرة، لأن الطاقة حينئذ سوف تعتمد على السرعة. فاللاختية تعنى أن الفعل الذى يدخل اللعبة له دور فى تحديد قواعد اللعب. فلا يمكنك مثلاً أن تضع مقداراً ثابتاً للاحتكاك حتى تأخذه فى الاعتبار، لأنه هو نفسه يعتمد على السرعة، فى نفس الوقت الذى تعتمد فيه السرعة عليه. هذه الاعتمادية المتبادلة هى ما يجعل النظم غير الختية مستعصية على الفهم، ولكنها فى نفس الوقت تعطى هذه النظم ثراء لا يتاح للنظم الختية. ففى ديناميكا الموائع توجد معادلة شاملة تجمع كافة المتغيرات، تسمى معادلة نافير - شتوكس Navier - Stokes، وهى آية فى الإيجاز والشمول، ولكنها غير ختية، ولذا فهى مستعصية على التحليل الكامل. إن

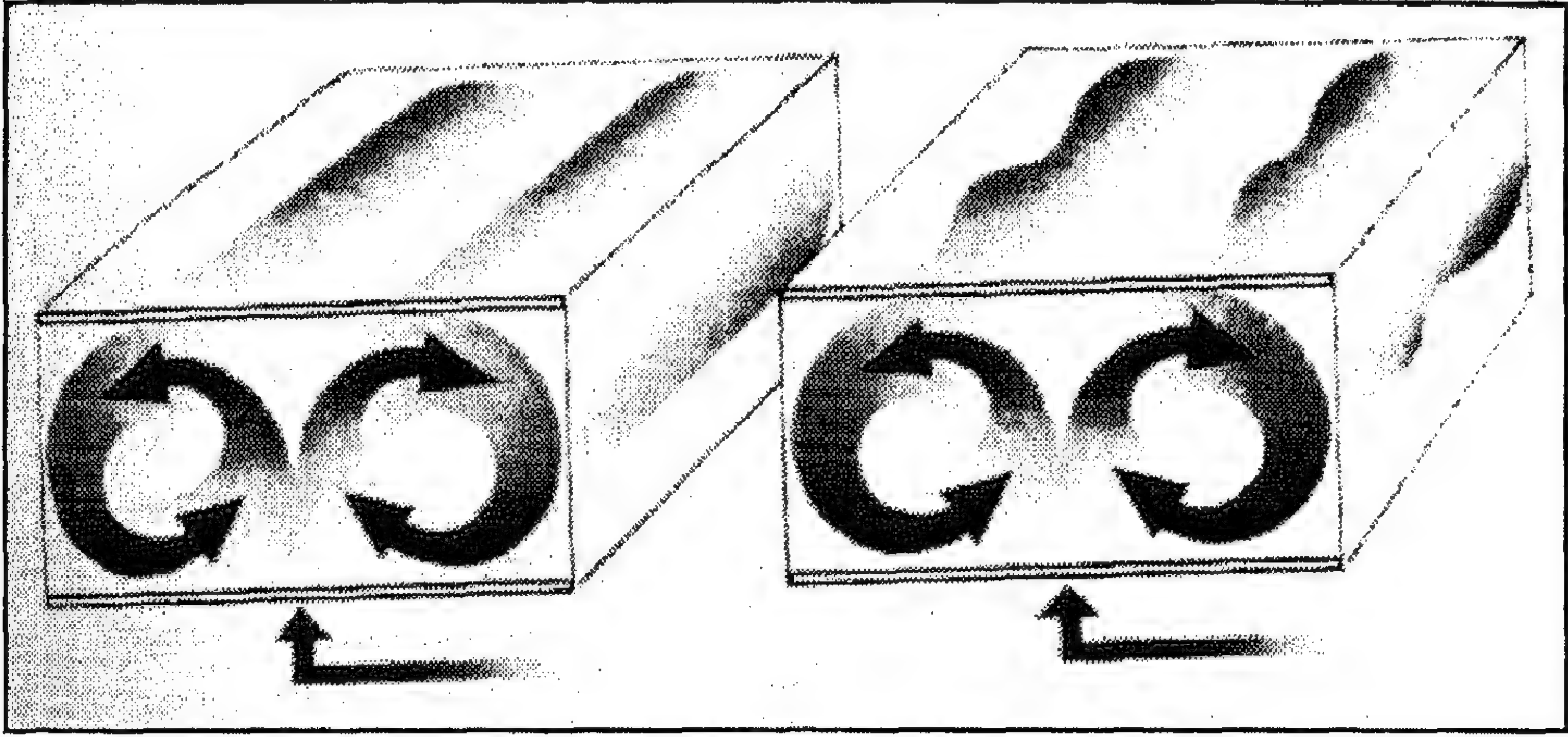
التعامل مع معادلة من هذا القبيل أشبه بالسير فى متاهة تتشكل حواجزها بتأثير خطوات السائر بها. كان حريا بالعالم أن يكون غير العالم، وألا يكون العلم بحاجة للهيولية، فقط لو لم تحتو معادلة كهذه على عنصر اللاخطية.

إن ما أوحى لـلورنز بمعادلاته الثلاث هى العملية المعروفة باسم "عملية الحمل convection" وفيها ترتفع السوائل والغازات حينما ترتفع درجة حرارتها. فالهواء الجوى تزداد حرارة الملاصق منه للأرض حين تسخنها أشعة الشمس، فيرتفع إلى ما فوق الهواء البارد الذى يهبط لأسفل، فيما يعرف بتيارات الحمل. وكان لورنز راضيا بشرح الظاهرة كما تجرى فى فنجان القهوة، قائلاً عنها إنها من العمليات الهيدروميكانكية التى يهمنى أن نعلم كيف نقوم بعملية التنبؤ فيها. كيف لنا أن نحسب الوقت الذى يبرد فيه فنجان من القهوة؟ إذا كان الفنجان ساخناً بدرجة طفيفة، فإن حالته تكون مستقرة ولا نواجه حركة بالسائل، أما لو كان ساخناً جداً، فإن تيارات الحمل تقلب السائل من أسفله إلى أعلاه، وهو ما يبدو واضحاً حين نضع قليلاً من مبيض القهوة فيها. إن مآل النظام على المدى الطويل واضح، سوف يستقر السائل وتسكن حركته، بسبب برودته، وبسبب أن الاحتكاك داخل السائل سوف يقاوم تيارات الحمل. ويقول لورنز لمستمعيه من العلماء: "إننا نواجه مشكلة فى تقدير ما ستكون عليه درجة حرارة السائل بعد دقيقة، ولكن ليس بعد ساعة". إن معادلات الحركة التى تحكم حركة السائل أثناء فقدته للحرارة يجب أن تعكس مآل السائل، فالحرارة يجب أن تؤول إلى درجة حرارة الغرفة، والسرعة إلى السكون.

وقد تولى لورنز تبسيط معادلات الحمل إلى أقصى مدى ممكن، ولكنه حافظ على اللاخطية. وقد بدت المعادلات لبساطتها سهلة الحل أمام أقرانه من العلماء، ولكنه قال محذراً: "إذا كنتم تعتقدون أنه بإمكانكم الالتفاف حول الجزء اللاخطي، فأنتم واهمون".

إن أبسط نظام للحمل فى المراجع العلمية يُصوّر على شكل صندوق به سائل، أملس عند القاعدة، يكون سطحه فى درجة حرارة أبرد مما عليه قاعدته. ويحكم الفرق بين درجتى الحرارة تصرف النظام، فإن كان طفيفاً ظل السائل ساكناً، وتنتقل الحرارة من أسفل إلى أعلى بالتوصيل الحرارى العادى conduction، كما لو كان السائل قضيباً من المعدن. لن نجد هنا ما يشير السائل للحركة، والأكثر من ذلك، فإن الوضع يكون مستقراً، فلو حدث أن اهتز الصندوق لأمر عارض، فإن الاضطراب نتيجة هذا الاهتزاز سرعان ما يذوى، ويعود السائل إلى حالة السكون.

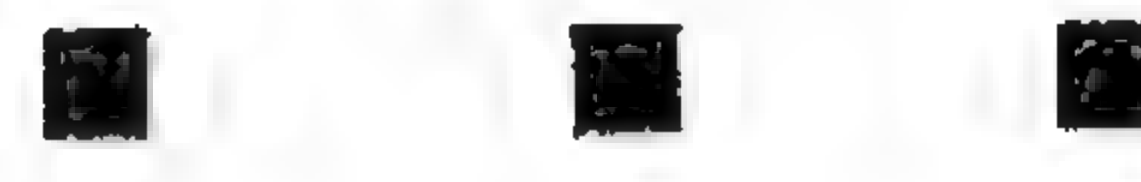
والآن، ما أن يوقد المسخن أسفل الصندوق بدرجة أكبر، حتى يبدأ تصرف جديد للسائل. يسخن السائل عند القاعدة، فيتمدد، وتقل كثافته بالتالي، فيخف وزنه، وحين يستطيع التغلب على الاحتكاك، يشق طريقه لأعلى، بينما يهبط السائل البارد للأسفل. وحين يكون تصميم الصندوق متقنا، تتكون اسطوانة من السائل الساخن الصاعد في أحد الجانبين، مع اسطوانة من السائل البارد الهابط على الجانب المقابل، ومن زاوية مناسبة يرى السائل يتحرك حركة دائرية.



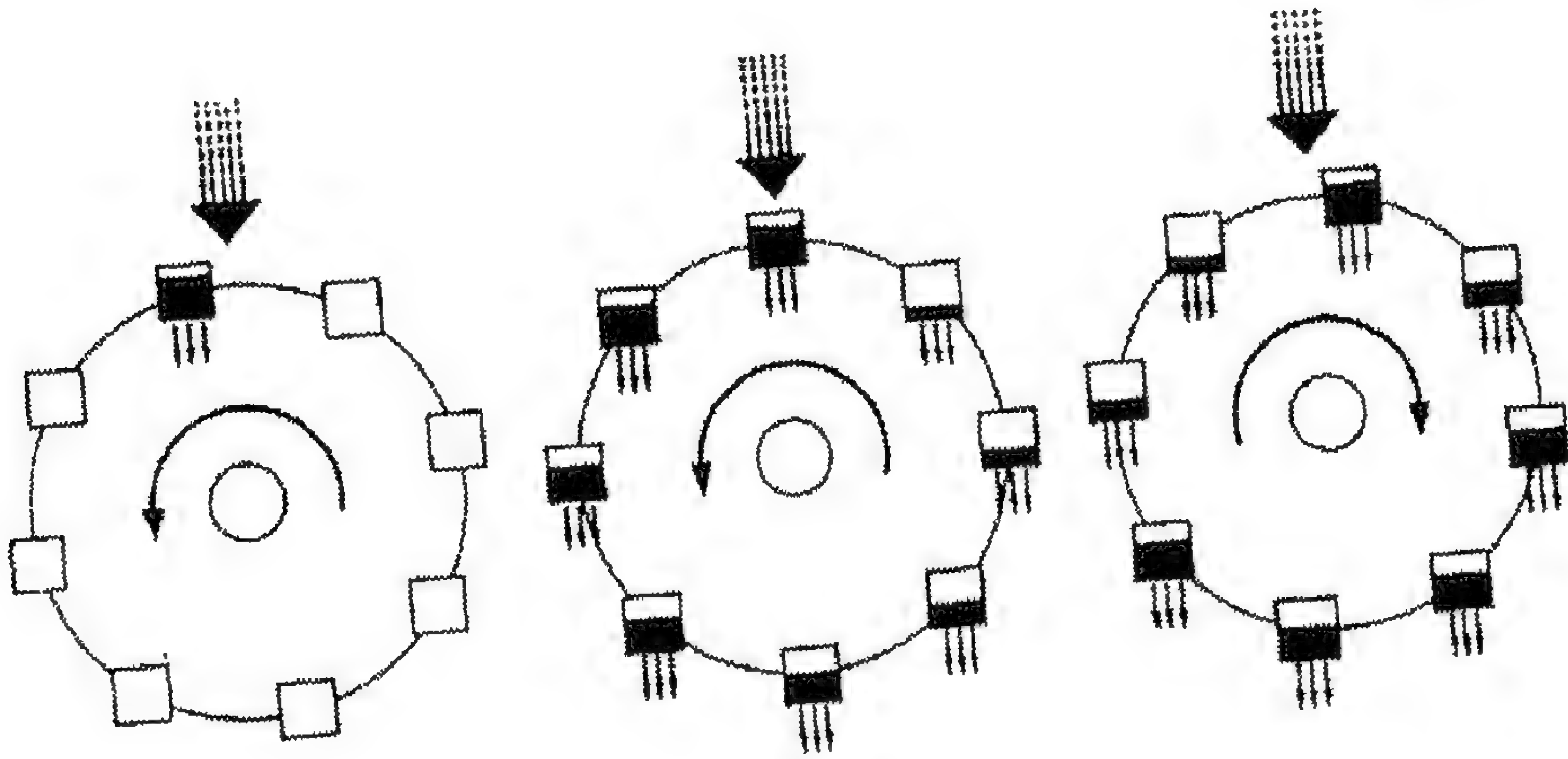
شكل ٢ - ١ مائع يدور: عندما يسخن سائل أو غاز من أسفل، يحاول المائع أن يعدل من نفسه على صورة اسطوانة دوّارة (يسار)، إذ ترتفع الجزيئات الساخنة منه إلى أعلى، وتهبط الباردة إلى أسفل في الاتجاه المقابل، وهو ما يعرف بتيارات الحمل. وحين تزداد درجة حرارة التسخين من أسفل، تنشأ بعض الاهتزازات التي تتحرك على طول الاسطوانة جيئة وذهابا (يمين). عند درجة حرارة تسخين أعلى، يضطرب المائع بشكل عشوائي.

وفي خارج المعمل أيضا، تصنع الطبيعة حركة مشابهة للهواء. فحين تسخن الشمس الأرض مثلا في صحراء، تصنع تيارات الحمل للهواء الساخن ظلّالا على السحب وعلى الرمال. وبزيادة درجة حرارة التسخين، يزداد تعقد النظام، حيث يشتد الاضطراب في السائل. لقد كان نموذج لورنز أبسط من أن يمثل حالة كهذه، فهو يقف عند حد توليد الحركة الدائرية البسيطة التي ذكرناها. ورغم أن نظامه لم يمثل الحمل بصورة واقعية كاملة، فإنه قد تبين أنه يمثل العديد من النظم بدقة، من ذلك أن معادلاته قد وصفت الدينامو الكهربائي القديم، وهو الجد الأعلى لمولدات الكهرباء الحديثة، حيث يدور قرص

داخل مجال مغناطيسي. وتحت ظروف معينة، وُجد أن القرص يمكن أن يعكس من اتجاه دورانه، وقد تصور بعض العلماء، بعد أن أصبحت معادلات لورنز معروفة، أن هذه الظاهرة يمكن أن تفسر ظاهرة أخرى، ألا وهي انعكاس المجال المغناطيسي للكرة الأرضية، وهو ما حدث عدة مرات على مدى تاريخها، في أوقات غير منتظمة أو مفهومة. وفي حالات اضطراب كهذه يلجأ العلماء للبحث عن أسباب خارجية عن النظام، ولكن بدا الأمر كما لو كان النظام المغناطيسي للأرض يحمل معه طبيعته الهولوية.^(١)



ومن النظم الأخرى التي وصفتها معادلات لورنز بدقة نظاما معيناً لعجلة مائية، تعتبر تمثيلاً ميكانيكياً لنظام الحمل في الموائع. في القمة، يتساقط الماء بصورة ثابتة في دلاء (جمع دلو) معلقة في حافة العجلة، كل دلو يسرب الماء بصورة ثابتة من ثقب بأسفله. إذا كان التيار المتساقط بطيئاً، فقد لا يصل الماء في الدلو الأعلى إلى وزن يمكنه من إدارة العجلة. ولكن مع زيادة سرعة التيار تبدأ العجلة في الدوران، ويكون في البداية منتظماً، على أنه مع زيادة سرعة التيار المتساقط، قد يصل الماء في الدلاء من الثقل بحيث يدفع العجلة عند سقوطه إلى الناحية الأخرى ليرتفع بقدر ما، قبل أن يهبط مرة أخرى، وشيئاً فشيئاً تبدأ العجلة في التآرجح، فتدور مرة في هذا الاتجاه ومرة في الاتجاه المضاد.



شكل ٣ - ١ عجلة لورنز الدوارة: يمثل أول نظام هيولي شهير اكتشفه لورنز جهازاً ميكانيكياً لعجلة دوارة، قادر على بساطته أن ينتج تصرفات معقدة بدرجة مذهلة.

تتشترك الحركة الدورانية للعجلة مع الاسطوانات الدوارة لتيارات الحمل فى بعض الخصائص. فالعجلة أشبه بشريحة عرضية فى الاسطوانة، وكلا النظامين يدفعان دفعا للحركة عن طريق طاقة من مصدر ما، فى العجلة عن طريق الماء وفى حالة تيارات الحمل عن طريق الحرارة. وكلاهما يشتمل الطاقة، السائل يفقد الحرارة، والعجلة تفقد الماء. وفى الحالتين يعتمد تصرف النظام على قوة الطاقة الدافعة.

يصب الماء من أعلى بتدفق ثابت، فإذا كان بطيئاً، لن يمتلئ الدلو الأعلى بالدرجة التى تمكنه من التغلب على الاحتكاك، فلن تدور العجلة أبداً. ويقابل ذلك ألا يتمكن السائل من التغلب على اللزوجة، فلا تتكون تيارات الحمل. وعندما يزيد تدفق الماء، يبدأ الدلو الأعلى فى الحركة (يسار)، فتدور العجلة بسرعة ثابتة (وسط).

وعند زيادة التدفق بسرعة أعلى (يمين)، تتحول الحركة الدورانية إلى حالة الهولوية، حيث تتأرجح العجلة ذات اليمين وذات الشمال. ويكون ذلك حين تتدخل اللاخطية فى النظام، فسرعة الامتلاء للدلاء تعتمد على سرعة الدوران (يقابل عدم تمكن السائل من امتصاص الحرارة بسبب زيادة سرعة تيارات الحمل)، وسرعة الدوران بدورها تعتمد على سرعة الامتلاء. وفى حالة السرعة العالية للدوران، يمكن لدلو فى الجهة المقابلة أن تندفع للجهة الأخرى قبل أن تتمكن من تفريغ ما بها، فتبطئ من سرعة الصعود إلى أن تتسبب فى انعكاس الحركة.

وقد اكتشف لورنز فى الواقع أن الحركة على المدى الطويل يمكن أن تنعكس عدة مرات، بحيث لا تستقر على حالة ثابتة، ولا تكرر نفسها أبداً فى نمط قابل للتوقع.

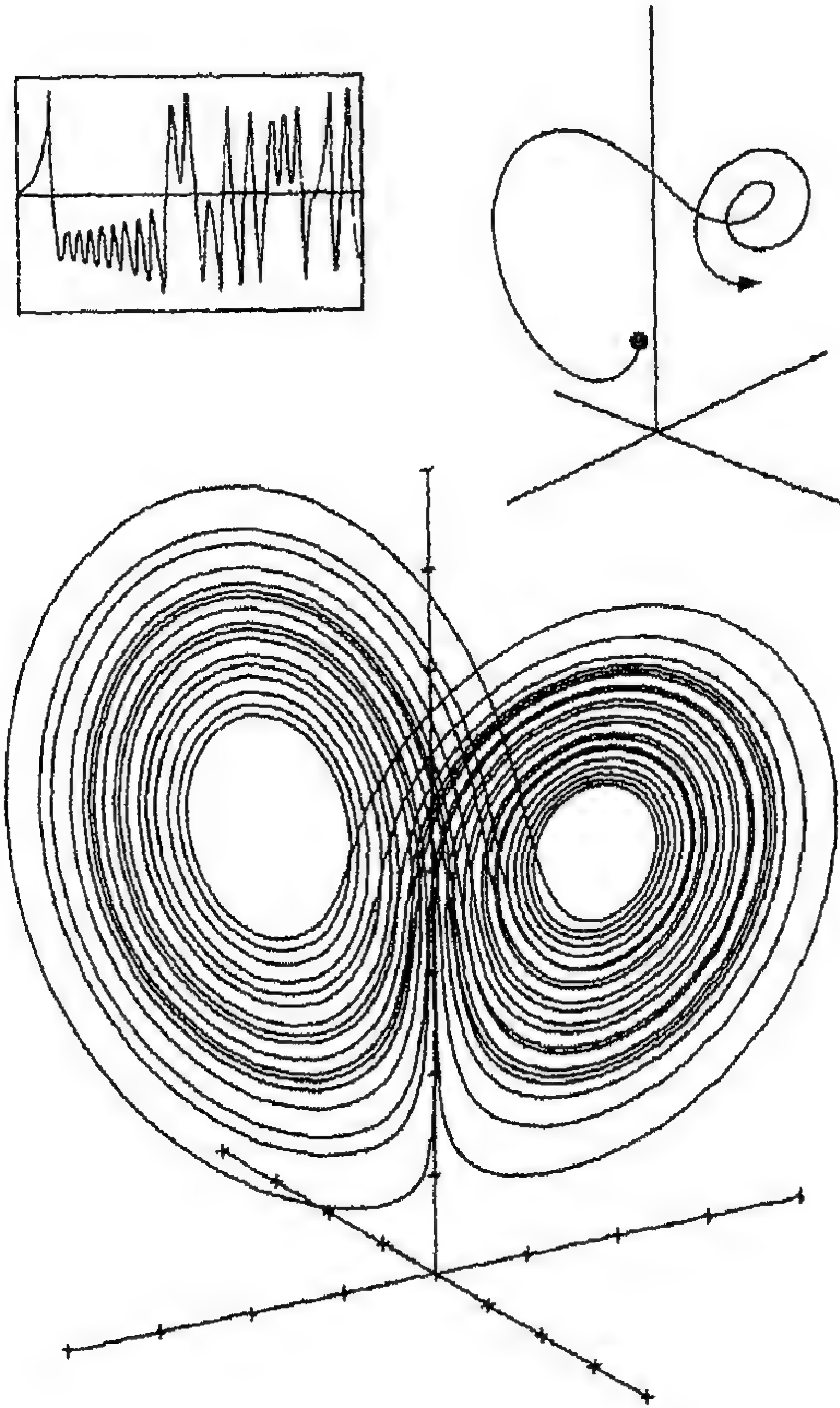
ويدلنا الحدس الفيزيائى إلى أن النظام مآله إلى الاستقرار، إما أن تدور العجلة منتظمة فى اتجاه واحد، أو تستقر فى التردد بين الاتجاهين بصورة منتظمة أيضاً، ويعتمد ذلك على شدة التيار المتساقط. ولكن ما وجده لورنز كان شيئاً آخر.

ثلاثة معادلات بثلاث متغيرات تصف حركة النظام تماماً، وأخرج حاسوب لورنز أرقاماً تعبر عن تلك المتغيرات: ٠ - ١٠ - ٤٠ - ١٢ - ٩٠ - ٢٠ - ١٦٠ - ٣٦ - ٢ - ٣٠ - ٦٦ - ٥٤ - ١١٥ - ٢٤ - ٩٣ - ١٩٢ - ٧٤، تتغير الأرقام الثلاثة صعوداً وهبوطاً مع سريان وحدات الزمن التخيلية، خمس وحدات، مائة وحدة، ألف وحدة، وهلم جرا.

ولجعل الصورة أكثر وضوحاً، استخدم لورنز أسلوب توقيع نقاط الفضاء الجسم (ثلاثي الأبعاد) لتوقيع تلك النقاط على منحنى فراغى. ورسمت نقاط المنحنى الموقعة شكلاً متصلاً، تعبر عن سلوك النظام. وفى مثل هذه الحالة يمكن أن ينتهى المنحنى عند نقطة ثابتة، معبراً

عن أن النظام قد وصل لمرحلة الاستقرار عند وضع معين، أو أن يأخذ المنحنى شكل قوس مقفل، يكرر نفسه عليه، معبراً عن أن النظام قد استقر على حركة متذبذبة.

ولكن شكل لورنز لم يكن محققاً أياً من الاحتمالين. كان يتكرر في حدود لا يخرج عنها، ولكن ليس على شكل قوس مقفل، بل في مسار منحنى لا يكرر نفسه أبداً، فهو لا يتقاطع مع نفسه بالمرّة، بمعنى تكرر نفس الحالة مرتين. إن المنحنى عبارة عن لولب فراغى مزدوج، أشبه بجناحي فراشة. لقد كان الشكل يعبر عن عدم انتظام، حيث إن الشكل لا يتقاطع مع نفسه، ولكنه نوع خاص من عدم الانتظام.



شكل ٤ - ١ جاذب لورنز: هذا الشكل الساحر، الذي يشبه عيني حدأة أو جناحي فراشة، أصبح رمزاً للاكتشافات الأولية للهيولية. إنه يكشف عن الهيكل المتقن المختفى

وراء تدفق من بيانات تبدو عشوائية. وقد كان النظام التقليدي هو توقع بيانات متغير معين مقابل الزمن (أعلى يسار)، ولكن توقع بيانات ثلاثة متغيرات مقابل بعضها البعض يتطلب أسلوباً مختلفاً، فعند لحظة معينة تمثل قيم المتغيرات الثلاثة عن طريق نقطة في فراغ ثلاثي الأبعاد. وكلما تغير النظام مع الزمن، رسمت هذه النقطة مساراً متصلاً مع تغير قيم المتغيرات (أعلى يمين).

ولأن النظام لا يكرر نفسه أبداً، فإن المسار لا يمكن أن يتقاطع مع نفسه، بل يظل متولباً إلى الأبد [ملحوظة من المترجم: التقاطع البادي في الشكل نوع من الخداع، لأن الشكل ثلاثي الأبعاد]. ويعكس التحرك على هذا المسار التغير المتواصل في حالة النظام، فمثلاً يمثل الانتقال من أحد الجناحين إلى الجناح الآخر انعكاس اتجاه دوران العجلة المائية أو تيارات الحمل.

وبعد عدة سنوات، حين كان العلماء يسترجعون معادلات لورنز الرائدة، كان لسان حالهم يقول: "ذلك البحث الرائع". إلا أن ذلك البحث بدا وقت ظهوره أشبه بوثيقة من التاريخ القديم، تحمل من الأسرار أكثر مما تكشف عنها. وعلى مدى آلاف من الأبحاث التي تناولت الهولوية، لم يحظ بحث بالرجوع إليه كما حظى بحث "السريان المحدد اللادوري *Deterministic Nonperiodic Flow*" وعلى مدى سنوات، لم يثر شكل خيال المبدعين كما أثار ذلك الشكل العجيب ذو الجناحين، والذي عرف باسم "جاذب لورنز *Lorenz attractor*"، ذلك الشكل الذي كشف عن مدى ثراء الهولوية.

ولكنه أمر لم يتضح إلا للقليلين وقتها، ويتذكر لورنز كيف عقب زميل له على الشكل مبتسماً: "إنك تعلم إن تيارات الحمل لا تتصرف هكذا، بالتأكيد سوف يصل النظام إلى نقطة استقرار". وبعد عدة سنوات، يروى عن نفس الزميل، بعد أن بنى بنفسه عجلة لورنز المائية، قوله: "لقد فانتنا جميعاً وجهة نظر لورنز وقتها، فهو لم يكن يفكر بنفس نمط تفكيرنا، لقد كان يبحث على أساس نظم مجردة عامة، تعبر بصورة ما عن السلوك الواقعي للعالم الخارجي".

إن رجل الشارع يعرف مدى ضيق التخصصات العلمية، فمن النادر أن يقرأ عالم بيولوجيا وعالم فيزياء، ولا عالم في البيئة وعالم رياضيات، نفس البحث، ولكن أبحاث الهولوية هي ما وحد بين كافة أفرع العلم على اختلاف مناهجها.

ولكن لورنز كان عالماً في الطبيعة الجوية، ولذا لم ينتبه الكثيرون وقتها إلى البحث المنشور في الصفحة ١٣٠ من المجلد العشرين في مجلة "علوم الهواء الجوي *Journal of the Atmospheric Science*".

- i رياضي شهير، من أشد المتحمسين لمبدأ التحديدية في العلم - المترجم
- ii مبدأ وضعه عالم الفيزياء وأحد مؤسسي النظرية الكمية فيرمير هايزنبرج، مفاده أن الجسيمات دون الذرية لا تخضع للقوانين بصورة صارمة، كما تفعل الأجسام الموثية، بل بصورة احتمالية لا يمكن حسابها يقيناً. فحركة الأرض حول الشمس تحكمها قوانين نيوتن، ويمكن التنبؤ بها إلى ملايين من السنين قادمة، أما حركة الإلكترونات في مدارها حول نواة الذرة فهي احتمالية، فلا يمكن القول بأن هذا الإلكترون بالذات سوف يكون في هذا الموضع بالذات بعد فترة من الزمن.
- ويجب التنويه إلى أن عدم القدرة على التنبؤ الصارم للظواهر الكمية بناء على هذا المبدأ يختلف في جوهره تماماً عن عدم القدرة على التنبؤ للظواهر الهيولية، ففي الحالة الأولى يمثل مبدأ عدم اليقين تمرداً على الفكر التحديدي الذي تبنّاه نيوتن ولا بلاس ومن تبعهما، أما في حالة الهيولية فعدم القدرة على التنبؤ يكون بسبب الطبيعة الهيولية للظاهرة كما سيأتي شرحها في ثنايا الكتاب، بينما هذه الظواهر خاضعة، من حيث المبدأ، لقوانين نيوتن التحديدية - المترجم
- iii رياضي يرجع إليه الفضل في وضع تصور للحاسوب في تصميمه الحديث، حيث قسّم عملياته الأساسية إلى: إدخال input، معالجة processing، إخراج output - المترجم
- iv يقصد بالتقارب في هذا السياق أن التغيرات التي تطرأ على ظاهرة ما تخمد تدريجياً إلى أن يعود النظام إلى نقطة الاستقرار التي كان عليها قبل التغير، وبهذا المفهوم يعتبر التقارب سمة للنظم المستقرة.
- المترجم
- v جدير بالذكر أن الحاسبات في هذا العهد لم تكن تتعامل مع الرسومات. - المترجم

ثورة علمية

يصف مؤرخ العلوم توماس كُون Thomas Kuhn تجربة أجراها عالمان نفسيان فى الأربعينيات، فيها عرضا على كل واحد من الخاضعين للتجربة مجموعة من أوراق اللعب، طالبين منهم أن يسموا ما رأوه من أوراق. كانت هناك خدع فى الأوراق، كأن توجد أوراق حمراء بطبيعتها، كالديناري، سوداء.

حين كانت فترة العرض للأوراق وجيزة، كانت إجابات المختبرين تلقائية، فليس فى الاختبار ما هو أيسر. لم يشعر أحد بوجود أى شذوذ عن المؤلف. ولكن حين عرضت الأوراق لمدة أطول، بدأ الأشخاص يترددون فى الإجابة. لقد وعوا وجود مشكلة ما، ولكن دون أن يحددها. قد يقول أحدهم إنه قد لمح شيئا غريبا، كوجود إطار أسود حول ورقة دينارى.

وتدريجياً، حين كان الوقت متاحا بدرجة أكثر، أدرك الكثيرون من المختبرين الأخطاء، ولكن ليسوا جميعا. لقد عانى البعض منهم من عدم تركيز أدى بهم للشعور بالألم. قال أحدهم: "ليس بإمكانى تحديد النوع، رباه، إننى حتى لا أعلم الآن ما هو شكل الأوراق الأصلية".

والعلماء، حين يتعرضون للمحات سريعة غير مؤكدة لأعمال الطبيعة، لا يكونون أقل تعرضا للبلبله والاضطراب النفسى حين يجدون فيها شيئا من الشذوذ، بينما هذا الشذوذ بالذات، حين يعدل من نظرة العلماء التقليدية، يرجع له الفضل فى تحقيق الثورات العلمية. هذا هو رأى كون، وتؤيد قصة الهيولية هذا الرأى.

لقد أثار رأى كون عن طريقة تحقيق الثورات العلمية، حين نشره فى الستينات، موجة من الاستياء وموجة من الإعجاب، لم ينتهيا إلى وقتنا هذا. لقد وجه طعنة نجلاء للرأى التقليدى الذى يذهب إلى أن التقدم العلمى يتحقق فقط بتراكم المعرفة، كل اكتشاف يضاف لسابقه، بحيث لا تنبع النظريات الحديثة إلا حين تتطلب الاكتشافات الجديدة ذلك. لقد قلل من شأن النظرة للعلم كعملية منتظمة من التساؤلات وإيجاد

الإجابات، حين أوضح جلياً الفرق بين العلم فى مساره التقليدي، والذي تقوم به الأكثرية من العلماء، وبين أعمال القلة من غير التقليديين، والذين يخرجون عن التفكير النمطى المألوف، وبهم تتحقق الثورات العلمية. لقد لمز بقوله العلماء كأناس يخضعون للمنطق بشكل كامل.

إنه يرى أن العمل المعتاد للعلماء هو أن يزيّدوا من الصرح المقام بالفعل ارتفاعاً وعلواً، بالسير قدماً على نفس النهج المرسوم فى المجال، ويعبر عن ذلك بالقول: "فى الظروف العادية لا يكون الباحث شخصاً مبتكراً، بل حلالاً للأغاز، واللغز الذى ينكب على حله يكون مصاعاً من قبل، وقابلاً للحل، على نفس النمط العلمى التقليدي".

ثم تأتى الثورات؛ طريق جديد يفتح حين تُسدّ السبل. غالباً ما يكون للثورات جانب يجمع بين أكثر من مجال، فاكتشافاتها تأتى غالباً من أناس يلعبون خارج الحدود المألوفة لمجالهم، فالموضوعات التى تشغل بالهم غير معترف بها فى مجالات التخصصات التقليدية. كثيراً ما تُرفض اقتراحاتهم، وتُعاد أوراقهم لعدم الصلاحية للنشر، بل هم أنفسهم يكونون فى حيرة من أمرهم، ولكنهم يقبلون المخاطرة، إن الصورة الرومانسية التى يعرضها كُون للثوريين من العلماء أنهم متحررو التفكير، يعملون على انفراد، غير قادرين على شرح ما يفكرون فيه أو يهدفون له، أو حتى خائفون من إخبار قرنائهم به، ولقد تحققت هذه الصورة فى قصة الهيولية أكثر من مرة.

كل رائد من رواد هذا العلم لديه قصة عن الإحباط الذى تعرض له، أو العداوة التى ووجه بها. الباحثون الجدد حذّروا من فقد مستقبلهم العلمى إذا أصرّوا على الكتابة فى مجال لم يُعترف به بعد، وليس للمشرّفين عليهم معرفة به. يسمع أحد الباحثين فى البيولوجيا عن نوع جديد من الرياضيات، يراه شيقاً وصعباً فى نفس الوقت، فيُشغف به، ولكنه لا يستطيع إخبار زملائه بما يفعل. أساتذة مخضرمون تنتابهم أزمة منتصف العمر، فيقامرون بالعمل - تحت تأثير سحر الجديد من الأفكار - فى مجال يعلمون أن زملاءهم لا يفهمونه أو ينكرونه. لقد قال فريمان دايسون Freeman Dyson، عالم الفيزياء الشهير، فى السبعينات إن خبر الهيولية كان له وقع الصدمة الكهربائية عليه، بينما قال آخرون إنهم قد عايشوا لأول مرة فى حياتهم العلمية تحولاً حقيقياً فى نمط التفكير العلمى.

وكم كانت حيرة الرواد الأوائل لعلم الهيولية بشأن كيفية صياغة أفكارهم، والتى غالباً ما كانت تعاني من عدم إمكان إرجاعها لمجال تقليدى يمكن أن تنشر تحت ظله. فعلى سبيل المثال، قد يكون البحث تجريبياً، ولكن ليس بالقدر الذى يبرر نشره كبحث

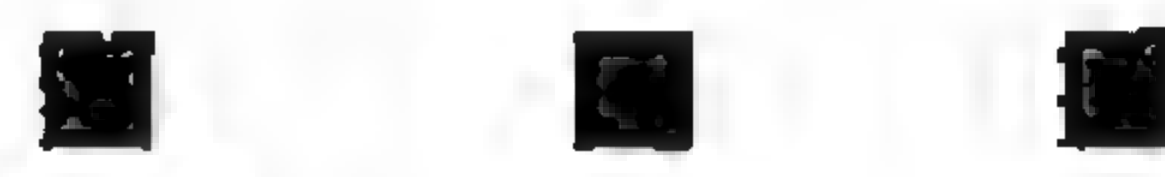
فى الرياضيات، وتجريبيا، ولكن ليس بالقدر الذى يكفى لنشره كبحت فى الفيزياء. ويرى البعض أن الصعوبة فى نقل أفكار هذا العلم، وما ووجه به من مقاومة عنيفة من التقليديين من العلماء، تبين بجلاء مدى الجدة والثورية فيه. إن الأفكار الضحلة سهل استيعابها، أما التى تتطلب من الناس أن يغيروا من أنماط تفكيرهم فمدعاة للكراهية والعداء.

لم يدرك العلماء السائرون على الدرب التقليدى بزوغ العلم الجديد إلا لماما، ووقف البعض منهم، خاصة فى مجال ديناميكا الموائع، موقفا عدائيا صريحا، بداية باتهام الهيولية بكونها مجرد أفكار فجأة وغير علمية، ثم بكونها تعتمد على نوع من الرياضيات مبهم وغير معترف به.

ومع ازدياد الباحثين فى علم الهيولية، استمرت بعض المراكز العلمية فى قفل الباب أمامهم، بينما رحبت بهم مراكز أخرى، ووضعت بعض المجالات العلمية قواعد غير مكتوبة برفض المقالات التى تتناولها، بينما قبلت ذلك مجالات أخرى صراحة. وبحلول منتصف الثمانينات، كان رواد الهيولية قد احتلوا مراكز علمية مرموقة، وسارعت المراكز العلمية إلى إنشاء أقسام فى "الديناميكا غير الخطية nonlinear dynamics"، و"النظم المعقدة complex systems".

لم تعد الهيولية مجرد نظرية، بل طريقة أيضا، ليست مجرد مجموعة أفكار تُعتَق، بل وسيلة لتنفيذ العلم. لقد خلقت الهيولية تقنياتها الخاصة بها مستخدمة الحاسوب، ليس بالضرورة فائق القدرة من طراز كراى أو سيبر، بل الأجهزة الشخصية المتواضعة منها. بالنسبة لعلماء الهيولية، أصبحت الرياضيات علما تجريبيا، قوامه الأشكال الرسومية التى تظهر على شاشة الحاسوب، والذى حل فى هذا العلم محل المعامل فى المجالات العلمية الأخرى.

آمال جديدة، أساليب جديدة، والأهم من ذلك، طريق جديد للرؤية. إن الثورات لا تأتى متدرجة، بل تحل بسببها نظرة للطبيعة محل أخرى. المسائل القديمة يُنظر إليها من منظور جديد، ومسائل جديدة تبدو للمرة الأولى. شيء أقرب لتغيير الأدوات الصناعية لنمط جديد من الإنتاج.



كان فأر التجارب للعلم الجديد هو البندول، الشعار التقليدى للميكانيكا، مثال للحركة المقيدة، ورمز للانضباط. يتحرك ثقله بحرية من جهة لأخرى، هل ثمة شيء أكثر منه استقراراً فى الحركة، وأبعد منه عن الاضطراب؟

فى حين كان لأرشميدس حمامه، ولفيوتن تفاحته، كان جاليليو ثرياً الكنيسة، تتأرجح فى رتابة لليمين واليسار، مرسلة رسالتها إلى إدراكه. وما لبث البندول أن تحول إلى أداة لضبط الوقت، مدخلة الحضارة الغربية فى طريق لا رجعة فيه. إن كافة الساعات تقريباً، على اختلاف أحجامها (إلى ظهور ساعات الكوارتز) تعتمد على نظرية البندول بصورة أو بأخرى، وتقريباً ترجع أية حركة ترددية على الأرض إلى أحد أقارب البندول. الدوائر الإلكترونية تصور بمعادلات تشابه تماماً معادلات البندول، ورغم أن المذبذبات الإلكترونية أسرع آلاف المرات، إلا أن الأساس الفيزيائى واحد. وبحلول القرن العشرين، أضحي البندول من المسائل التى تدرس فى المراحل المتوسطة من التعليم، لا يستدعى ما هو أكثر مستوى.

ولكن البندول كان لا يزال لديه ما يعطيه. حين رآه جاليليو أحس فيه بترددية يمكن قياسها، احتاج لتفسيرها أن يقوم بثورة علمية فى تحليل الحركة، فاستعان بأصدقائه لكى يقوموا بقياس الترددات على مدى أربع وعشرين ساعة، فيما يعتبره الكثيرون ميلاد العلم التجريبي كما عرفه العلم بعد ذلك. وقد أحس جاليليو بتلك الترددية لأنه كان قد كوّن بالفعل نظرية تتنبأ بها. لقد رأى ما لم يره علماء الإغريق؛ إن الأجسام المتحركة تحاول أن تستمر فى حالة الحركة، ولتغيير تلك الحالة مقداراً أو اتجاهها يجب تدخل قوة خارجية، كاحتكاك مثلاً.

والواقع أن نظريته كانت من القوة بحيث أعطته إحساساً بترددية غير موجودة عملياً، لقد اكتشف أن البندول يستغرق نفس زمن التردد بصرف النظر عن سعة تردده، فالبندول الذى يقطع مسافة أكبر فى الحركة يفعل ذلك بدرجة أسرع بالضبط لكى يتزامن مع آخر أقل منه أرجحة. ولكن الترددية التى رآها جاليليو ليست إلا حالة تقريبية، فحركة البندول تتضمن قدراً من اللاخطية بسبب المعوقات؛ مقاومة الهواء والاحتكاك، اختار أن يتجاهلها حتى يستطيع وصف الحركة الترددية وصفاً نظرياً.

ويدرك طلاب القرن العشرين أن اللاخطية تستعصى على الحل، وهو أمر صحيح، وأنها تستبعد لعدم أهميتها، وهو أمر غير صحيح. فالعلماء لا يمكنهم أن يفهموا الاضطرابات إلا بفهمهم للبندول، ولكن بصورة لم تكن متاحة فى مطلع هذا القرن. وحين بدأت الهيولى فى ربط مجالات العلم المختلفة، اتسع نطاق تطبيق الحركة البندولية ليشمل العديد من صور التحليل الأخرى، من التوصيل الفائق إلى وصلة جوزيفسون Josephson junction¹¹ وقد أظهرت بعض التفاعلات الكيميائية تصرفات أشبه بالبندول، وكذا ضربات القلب. ولم تقف الاحتمالات غير

المتوقعة عند هذا الحد، فكما كتب أحد الفيزيائيين أنها قد تمتد إلى: "الطب النفسي والعضوي، والتحليل الاقتصادي، وربما تطور المجتمعات".

تصور أرجوحة في ملعب، تتعاجل وهي هابطة، ثم تندفع صاعدة، وتفقد أثناء ذلك قدرا من طاقتها نتيجة المعوقات، وفي نفس الوقت تأخذ دفعة من مصدر خارجي. يخبرنا إحساسنا بأن الأرجوحة سوف تستمر في الحركة، صاعدة إلى نفس الارتفاع كل مرة، وهو ما يحدث عادة، ولكن الاحتمال الآخر موجود، أن تتحول الحركة إلى حركة شاذة، تتأرجح بين الارتفاعات المختلفة، لا تستقر أبدا عند إيقاع واحد، ولا تكرر نفسها مرتين.

هذه الحركة الشاذة المفاجئة تأتي من الاعتمادية التبادلية التي شرحناها في الفصل السابق، والتي تتمثل في سريان للطاقة دخولا وخروجا في الحركة الترددية، فهي حركة مُحفزة ومُحفزة في نفس الوقت، مُحفزة بسبب المعوقات، ومحفزة بسبب ما تحصل عليه من دفع خارجي. والعالم الطبيعي ممتلئ بمثل هذا النظام، فالطقس مثلا، نظام مخمد بسبب احتكاك الهواء والماء وتسرب الحرارة في الفضاء، ومحفز بالطاقة الشمسية.

ولكن عدم القدرة على التنبؤ لم يكن هو الدافع للعودة لدراسة الحركة البندولية بجدية في الستينات والسبعينات، بل مجرد السبب في جذب الانتباه. فدارسو الديناميكية الهيولية قد وجدوا أن التصرفات غير المنتظمة للنظم البسيطة تتصرف كعمليات خلّاقة، فهي تنتج التعقد، بما فيه ثراء في الأنماط المنتظمة، حينما مستقرة وحينما غير مستقرة، حينما محدودة وحينما غير محدودة، ولكنها دائما ممثلة بالحياة التي تأخذ بالألباب، ولهذا السبب يحلو للعلماء اللجوء بالألعاب.

من ذلك لعبة شائعة تسمى **البندول الكروي**، لا يتحرك فقط جيئة وذهابا، بل في أي اتجاه، وتوزع مجموعة من المغناطيسات على قاعدته تجذب الثقل كلما اقترب من إحداها. وتكمن الفكرة في ترك الثقل يتحرك، ويخمن المرء أي المغناطيسات سوف يفوز. حتى مع الاكتفاء بثلاثة مغناطيسات على شكل مثلث، يصعب التخمين تماما. ستجد الثقل يتذبذب بين المغناطيس الأول والثاني، ثم بين الثاني والثالث، وما أن يلوح أنه سوف يستقر عند الثالث، حتى تراه يقفز عائدا للأول.

لنفرض أن عالماً أراد منك توقيع هذه المواضع على خريطة، على النحو التالي: خذ نقطة بداية، وأمسك بثقل البندول عندها، ثم أرسله، ثم لون موضع هذه النقطة على

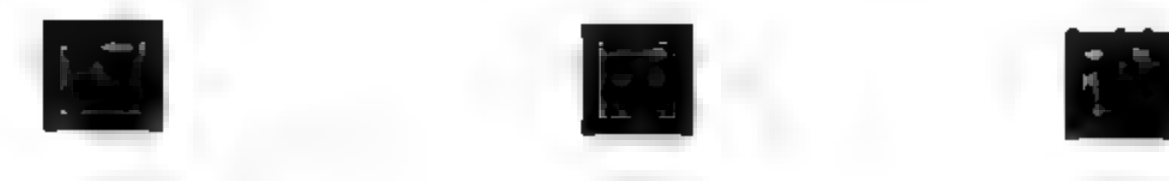
الخريطة باللون الأحمر أو الأخضر أو الأزرق، بحسب أى من المغناطيسات ينتهى إليه الثقل. كرر العملية عند نقطة بدء أخرى، إلى أن تنتهى من رسم الخريطة التى تبين العلاقة بين كل نقطة ابتداء والمغناطيس الذى ينتهى إليه الثقل. من المتوقع أن تجد منطقة من الخريطة ملونة باللون الأحمر، وأخرى بالأزرق، وثالثة بالأخضر، وهذا حق. ولكن المفاجأة هى أنك سوف تجد مناطق تتداخل فيها الألوان، بحيث تجد بجوار كل لون نقاطا من اللونين الآخرين. ومهما بالغت فى التكبير أو التصغير، فإن التداخل مستمر على كافة درجات الدقة فى التمحيص. هذه هى المناطق المعبرة عن حالة الهولوية، والتى يصعب فيها التنبؤ بمآل الثقل.ⁱⁱⁱ

كان الرأى التقليدى بالنسبة للنظم الديناميكية أنه بمجرد كتابة المعادلات للنظام، يتحقق فهمه تماما. فهل ثمة من وسيلة أفضل لتمثيل النظام؟ فى حالة الأرجوحة، تربط المعادلات بين زاوية الأرجوحة وسرعتها والاحتكاك والقوة الدافعة. ولكن بسبب لمحة اللاخطية فى النظام، قد يجد الباحث نفسه فى حيرة كاملة عند الرد على سؤال عملى مرتبط بمستقبل النظام. ويمكن للحاسوب تمثيل النظام، والقيام بالعمليات الحسابية بسرعة فائقة، ولكن التمثيل الحاسوبى له نقطة ضعفه، حيث إن درجة التقريب مهما بلغت ضاآلتها لا بد وأن تتراكم سريعا، بسبب الحساسية المرهفة للظروف الأولية، وسرعان ما تختفى الإشارة الأصلية، ولا يتبقى إلا التشويش.^{iv}

أحقا ذلك؟ لقد صادف لورنز اللاتنبئية، ولكنه وجد نمطا أيضا. وقد وجد غيره أيضا أشكالا مقترحة فى نظم تبدو فوضوية. لقد كان مثال البندول من البساطة لدرجة أنه يمكن التغاضى عنه، ولكن من رفض ذلك، وجد فيه رسالة ذات مغزى هام، إن العلماء بإمكانهم فهم الحركة البندولية تماما، ولكن ليس إلى المدى البعيد. إن الحركة واضحة على المستوى النظرى، أما على المستوى العملى فغامضة أشد الغموض. إن الأسلوب التقليدي، المتمثل فى تجزئة النظم وعزلها، ثم إضافتها لبعضها البعض، قد أخذ فى الانهيار. بالنسبة للبندول، والدوائر الكهربائية، والليزر، والموائع، لم تعد المعادلات الأساسية هى نوع المعرفة المناسب فى كافة الأحوال.

بمرور الستينات، حقق بعض العلماء بعد لورنز اكتشافات مشابهة، كحالة فلكى فرنسى يدرس حركة المجرات ومهندس يابانى يدرس الدوائر الإلكترونية. ولكن أول دراسة منهجية لمحاولة فهم كيفية اختلاف التصرفات الشاملة للنظم عن التصرفات الجزئية كانت على يد الرياضيين، من بينهم ستيفان سمول Stephen Smale من جامعة كاليفورنيا. لقد سأل أحد الباحثين الشبان ذات يوم عن مجال دراسة سمول،

وكانت الإجابة مفاجأة له: "المذبذبات oscillators". إن هذا الموضوع قُتل بحثًا، وهو يُدرس لطلاب ما قبل التخرج، فكيف برياضى فذ أن يشغل به نفسه؟ لم يدرك السائل إلا بعد عدة سنوات أن سمول كان يبحث فى الخصائص غير الخطية، أى المذبذبات الهيولية، وأنه يرى أشياء تعلّم العلماء طويلا ألا يروها.



اعتنق سمول فى البداية تصورا خاطئا، فقد بين بعبارات رياضية قوية أن كافة النظم الديناميكية لا بد أن تستقر على تصرف مألوف، ثم سرعان ما أدرك أن الأمور لا تسير بهذه البساطة.

كان سمول لا يقوم بحل مسائل رياضية فقط، بل يضع مسائل لغيره لحلها. لقد استغل بنجاح باهر فهمه للتاريخ وقوة حدسه عن الطبيعة ليعلن فى عبارات رصينة قاطعة، أنه أن الألوان للمسائل التى ضرب عنها صفحا أن تحظى بوقت الرياضيين. وكما يفعل رجال الأعمال، قام بحساب المخاطرة، ثم وضع استراتيجيته. كان يُمثّل قائدا للمسيرة، أينما تولى تبعه الناس. ولم تقتصر شهرته على وضعه العلمي، فقد اشتهر عنه حملاته الشعواء ضد حرب فيتنام، لدرجة تنظيم جهود تهدف إلى إيقاف القطارات التى تحمل الجنود التى تمر بكاليفورنيا. وفى الوقت الذى أصدرت فيه المحكمة أمر الاستدعاء له، كان متجها إلى موسكو حيث حاز أعلى وسام علمى هناك؛ والمسمى Field Medal.

وكانت زيارته لموسكو حادثة تضاف إلى أسطوريته، خمسة آلاف من الرياضيين الذين يلهبهم الحماس والإثارة للقاءه مجتمعون لتحيته، وكان رجال المخابرات على أعلى درجة من التوتر لهذا التجمع. وشنّ سمول هجوما حادا على تدخل أمريكا فى فيتنام، وقبل أن يتمكن مستمعوه من الابتسام طربا، تحول هجومه إلى الاتحاد السوفيتى لكبته الحريات العامة وغزوه للمجر وتشيكوسلوفاكيا. وسبق لمكتب الاستخبارات على الفور، وحين عاد لبلاده، كانت منحة العلمية قد ألغيت.

كان مناط فخره العلمى هى أبحاثه فى الطوبولوجيا، فرع من الرياضيات ازدهر فى القرن العشرين، ووصل أوجه فى الخمسينات. وهو علم يهتم بدراسة السطوح، وما يحدث لها من التواءات أو انبعاجات أو غير ذلك من تغيرات، فهو علم الهندسة المطاطية. وهو لا يتعامل معها كأشكال ذات بعدين أو ثلاثة، كما هو الحال مع الهندسة الإقليدية العادية، بل بعدد أكبر من الأبعاد تعز على التخيل. وقد شيد سمول لنفسه فيه مركزا متميزا بحله معضلة من أعوص معضلاته، تسمى معضلة بوانكاريه.

ويعود كلا العلمين، الطوبولوجيا والنظم الديناميكية، إلى العالم هنري بوانكاريه Henri Poincaré الذي رأى فيهما وجهين لعملة واحدة. لقد كان في مطلع القرن العشرين آخر الرياضيين العظماء الذين جعلوا التخيل الهندسي قادراً على التعبير عن قوانين الحركة الفيزيائية. وكان أول من أدرك احتمال الهولوية^٧، مشيراً في كتاباته إلى نوع من عدم التنبئية على شاكلة ما اكتشفه لورنز بعد ذلك. وبعد وفاة بوانكاريه، في الوقت الذي ازدهرت فيه الطوبولوجيا، اضمحلت الدراسات الديناميكية، بل غاص الاسم في زوايا النسيان. والعلم الذي عاد إليه سمول رسمياً هو المعادلات التفاضلية، وهي معادلات تصف كيفية تغير النظم. والأمر التقليدي أن ينظر الباحث لكل عامل من العوامل على حدة، ولكن سمول، مثل بوانكاريه من قبل، أراد أن ينظر إليها نظرة شاملة، بمعنى أن يفهم عالمها كله في لمحة واحدة.

وتسمح أية مجموعة من المعادلات التي تصف نظاماً ديناميكياً معيناً -كمعادلات لورنز مثلاً- بتحديد عدة معاملات ابتدائية. ففي حالة الحمل الحراري، يكون أحد هذه المعاملات لزوجة السائل. والتغير الكبير في عامل ما يمكن أن يؤدي إلى تغير مماثل في تصرف النظام، كأن يغير حالة الاستقرار إلى حالة دورية. ولكن الفيزياء قد افترضت أن التغيرات الطفيفة في معامل ما سوف تؤدي فقط إلى فروق ضئيلة في الأرقام، وليس إلى تغيرات نوعية في التصرفات.

ويؤدي ربط الطوبولوجيا بالنظم الديناميكية إلى إمكان استغلال الشكل^٧ في المساعدة على تصور مدى التصرفات بأكملها. والنظم البسيطة، قد يكون الشكل عبارة عن نوع ما من الأسطح المستوية؛ والنظم المعقدة سطحا متعدد الأبعاد، كل نقطة فيه تمثل حالة النظام في لحظة معينة من الزمن. وبمرور الزمن، تتحرك هذه النقطة، راسمة مساراً عبر ذلك السطح. ويمثل انحناء بسيطاً في هذا السطح تغيير معاملات النظام، كأن يكون السائل أكثر لزوجة، أو أن يدفع البندول بقوة أكبر. والأسطح التي تبدو متقاربة الشكل، تعطي تصرفات متقاربة. فإذا ما أمكنك تصور الشكل، أمكنك فهم النظام.

وحين تحول سمول إلى النظم الديناميكية، كانت الرياضة البحتة تُدرس مترفعة عن التطبيقات العملية. ورغم أن منشأ الطوبولوجيا كان قريباً من الفيزياء، إلا أن هذا المنشأ كان مُجهلاً لدى الفيزيائيين، وكانت الأشكال تدرس لذاتها فقط. ولكن سمول بدأ يعتقد في أن الطوبولوجيا قد تحمل شيئاً من التطبيق في مجال الفيزياء، بالضبط كما كان ينوي بوانكاريه في مطلع القرن.

وتصادف أن كانت أوائل مساهمات سمول مبنية على تصوّره الخاطي، وهو أنه من المحتمل لنظام ما أن يتصرف بصورة شاذة، ولكن ماله إلى الاستقرار **stability**. ويقصد بالاستقرار في هذا المصّمار ألا تؤدي التغييرات الطفيفة إلى زعزعة النظام. خذ مثلاً قلم رصاص واقفاً على سنّه، توجد معادلة تصف هذا الوضع من الناحية النظرية، على أساس أن مركز الثقل فوق السن مباشرة. ولكن هذا الوضع غير مستقر، لأن أي تغير طفيف سيؤدي لوقوع القلم. أما لو تصوّرنا قطعة رخام في قاع محيط، فإن وضعها مستقر، حيث إن أي زحزحة لها سوف يتلوها عودتها إلى حالتها الأولى. وقد افترض الفيزيائيون أن أي نظام يمكنهم دراسته يجب أن يتميز بالاستقرار، حيث إن النظم الواقعية تتعرض على الدوام للاضطرابات وعدم التأكد بالنسبة للعوامل المؤثرة. فإذا ما نشدت نظاماً عملياً من الناحية الفيزيائية ومتماسكاً أمام الاضطرابات، فإن الفيزيائيين سيفهمون أنك تنشُد نموذجاً مستقراً على حالة ثابتة **steady state**.

وفي ١٩٥٩، حمل البريد لسمول أنباء سيئة. فالخطاب الذي جاءه من أحد زملائه يبيّن أن بعض النظم تستقر على حالة من الاضطراب، فإذا ما تعرض النظام لتغيرات طفيفة، شأن كافة النظم الواقعية التي تتعرض على الدوام للتداخل والشوشرة، فلن تزول عنه هذه الحالة، فهو متماسك ومضطرب في نفس الوقت. ودرس سمول الخطاب بعدم تصديق لم يدم طويلاً.

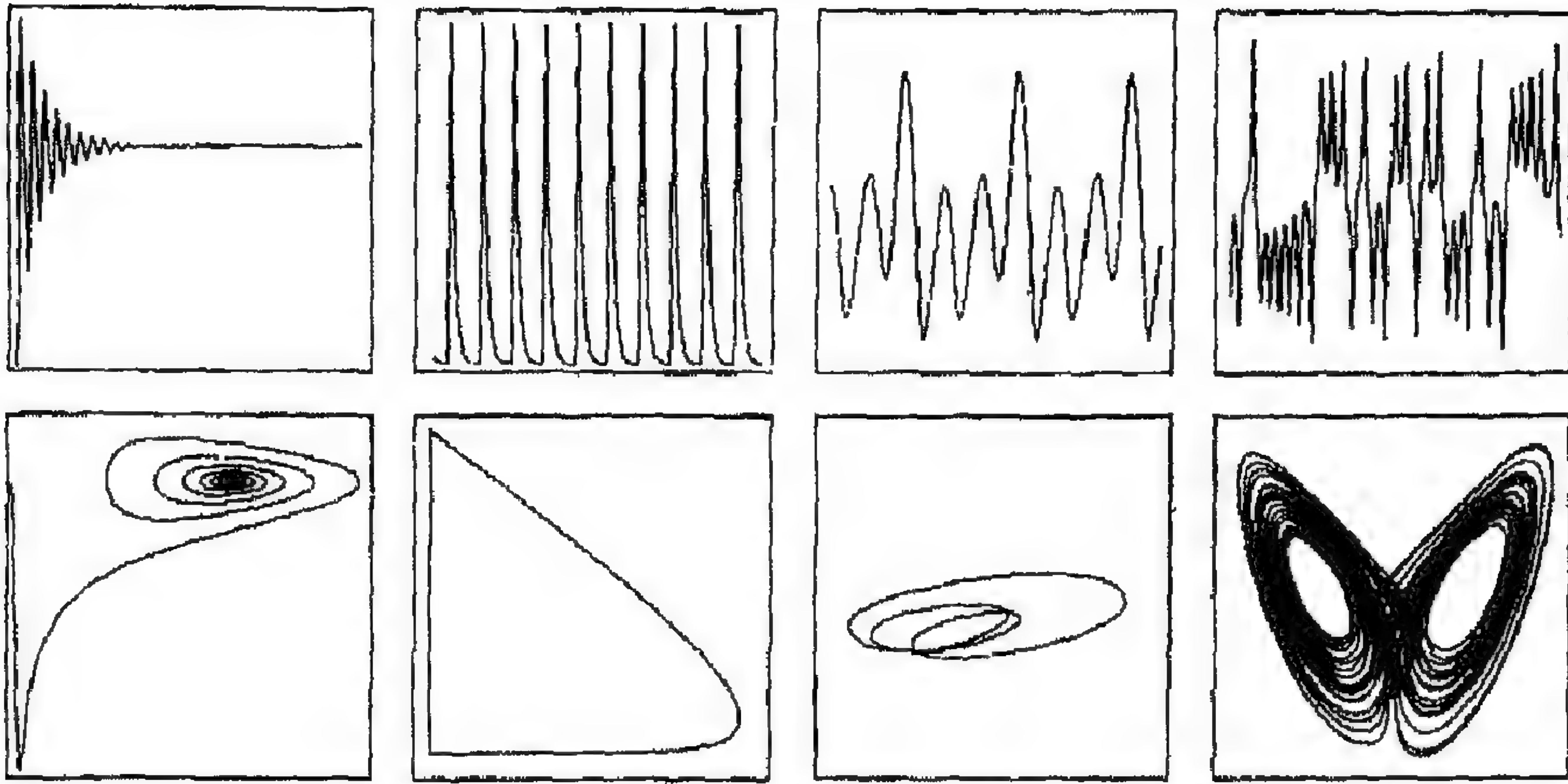
ليست الاضطرابات إذن هي بالضرورة عدم الاستقرار. فالنظام يمكن أن يوصف بالهيوولية، وهي حالة مستقرة، إذا صمد نمط معين من عدم الانتظام أمام الاضطرابات الطفيفة. وكان نظام لورنز شيئاً من هذا القبيل، ولكن الأمر اقتضى وقتاً ما قبل أن يسمع سمول عن لورنز. فالهيوولية التي اكتشفها لورنز، بكل ما فيها من عدم تنبئية، كانت مستقرة كقطعة الرخام في قاع المحيط. يمكنك أن تقحم عليه ما تشاء من شوشرة، وأن ترجّه وتهزّه، وتتدخل في حركته، ثم حين ينتهي كل ذلك، وتذوى الحالة الطارئة، يعود النظام إلى نفس النمط من عدم الانتظام. إنه على المستوى المحلي غير قابل للتنبؤ، وعلى المستوى الشامل مستقر. والنظم الديناميكية الواقعية تخضع لكم من القواعد المعقدة أكبر مما يتوقع أحد، ولكن النظام الذي حمله الخطاب كان بسيطاً، اكتُشف لأكثر من جيل مضى، يمثل بندولاً متخفياً، إنه دائرة كهربائية مهتزة اهتزازاً قسرياً، كأرجوحة الطفل.

كان النظام مجرد صمام إلكتروني، درسه في العشرينات مهندس يدعى فان در بول Van der Pol. وتدرس ظواهر هذه الدوائر اليوم بواسطة جهاز يسمى

الأوسيلوسكوب^{vii}، وهو ما لم يكن متاحاً وقت در بول، فكان يعتمد على الإنصات للترددات الصوتية ويميز ما يعتريها من تغير في النغمات. وكان سعيدا باكتشافه الانتظام في تلك التغيرات، عدا لحظات لم يكن يعرف لها تعليلا، فعزاها إلى الشوشرة التي تتعرض لها الخطوط التليفونية عادة. ولكنه كان قد تعرض في الواقع لحالة من الهولية لم يستطع إدراكها^{viii}.

ورغم ما كان عليه حدس سمول من خطأ، فإنه قاده على التو إلى طريق جديد لتصوّر التعقد للنظم الديناميكية تصورا شاملا. كان أوسيلوسكوبه الوحيد هو ذهنه، ولكنه كان ذهنا قد تشكل لعدة سنوات بالنظر في فضاءات الطوبولوجيا. لقد تمثل سمول فضاء الطور phase space لمذبذب در بول. إن كل حالة في لحظة معينة تمثل بنقطة في فضاء الطور، فتحمل إحداثيات هذه النقطة في ذلك الفضاء كافة البيانات عن تلك الحالة. وكلما تغيرت حالة النظام، تحركت النقطة إلى نقطة أخرى، وإذا كان التغير مستمرا، فإن النقاط ترسم مسارا في فضاء الطور.

فإذا كان النظام مجرد بندول يتأرجح، فإن فضاء الطور يكون مجرد مستطيل ذي إحداثيين، قد يكون الرأسى منهما معبرا عن زاوية البندول، والأفقى عن سرعته. ومع تأرجح البندول يكون المسار منحنى مغلقا يتكرر على نفسه مع اتخاذ البندول نفس الأوضاع في كل دوره.

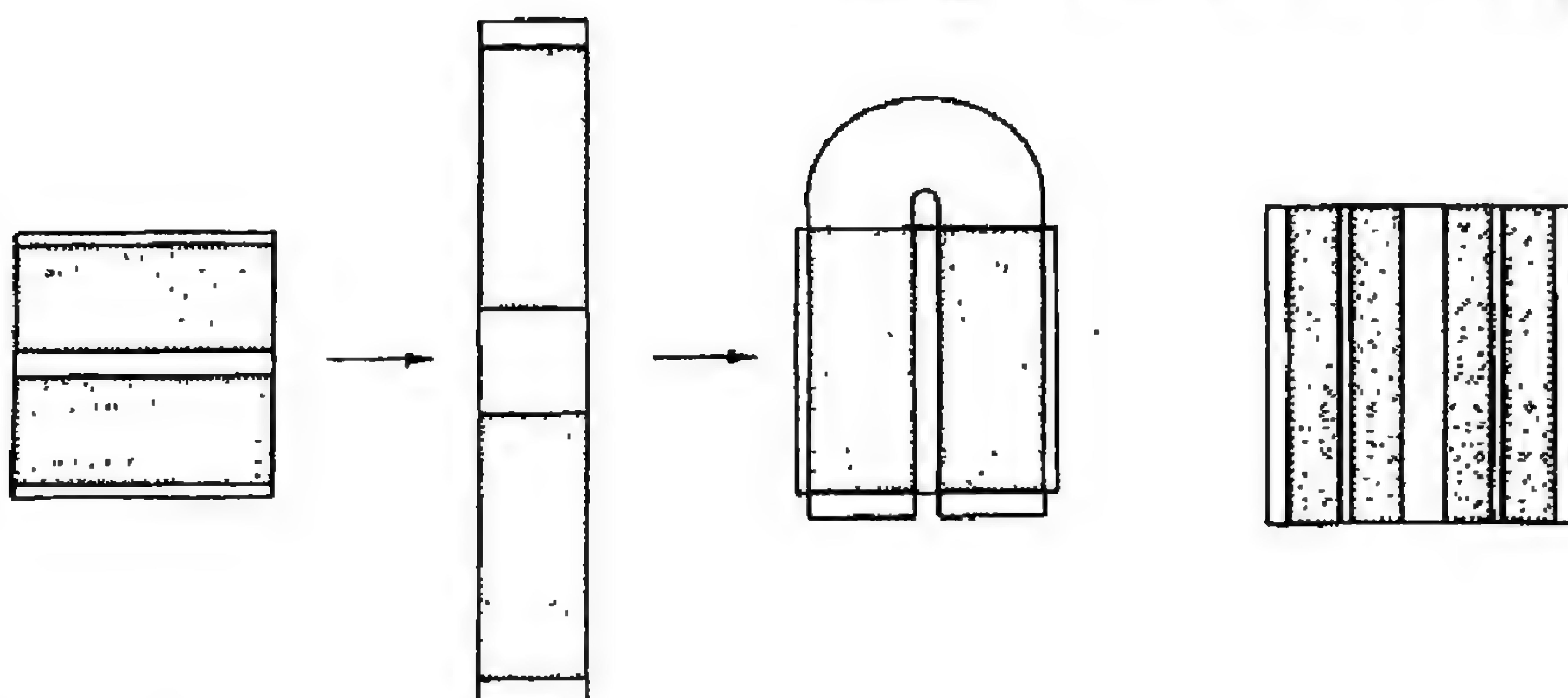


شكل ٢-١ تكون الأشكال في فضاء الطور: رسم المنحنيات التقليدية للتعبير عن التغير مقابل الزمن (أعلى) ورسم المسارات في فضاء الطور (أسفل) وسيلتان بيانيتان

لتصوير تصرف النظم الديناميكية على المدى الطويل، النظام الأول (يسار) يتقارب إلى حالة الثبات، وتمثل كنقطة على فضاء الطور. النظام التالي دوري، يكرر نفسه بانتظام على فترات منتظمة، فيمثل في فضاء الطور بشكل منغلق على نفسه يكرر نفسه بانتظام. الشكل الثالث يمثل نظاما دوريا ولكن بصورة أكثر تعقداً، وانعكس ذلك على فضاء الطور على صورة كم من الأشكال المنغلقة. النظام الرابع (أقصى اليمين) هيولى.

وبدلاً من أن ينظر سمول في مسار معين، ركّز النظر إلى تصرف الفراغ كله خلال تغير الظروف المحيطة بالنظام، كأن يضاف إليه مزيد من الطاقة، أو تishtت منه بعض منها. وقفز حدسه من المضمون الفيزيائي للنظام إلى نوع جديد من المضامين الهندسية، وكانت عدته في البحث هي التحولات الطبولوجية لأشكال فراغ الطور، حيث قد يحمل كل تغير مغزى فيزيقيا معينا؛ فانكماش الفراغ مثلاً يعنى تشتت الطاقة، وليكن بسبب الاحتكاك، كبالون يفقد ما به من هواء إلى أن يستحيل نقطة، عندها يصل النظام إلى مرحلة التوقف التام. ولتمثيل التعقد الكامل لمذبذب در بول، أدرك أن فضاء الطور يجب أن يعانى من نوع جديد من التحولات المعقدة، وعلى الفور وجه فكرته عن تصور السلوك الشامل لنوع جديد من النماذج، عُرف فيما بعد باسم نموذج الحدوة horseshoe، أصبح صورة للنظم الهيولية لعدة سنوات تالية^{١٠}.

ولأخذ صورة مبسطة عن حدوة سمول، خذ مستطيلاً مطّه ليأخذ شكل قضيب، خذ أحد نهايتي القضيب واطوه إلى الآخر، مكوناً شكل C، كالحدوة، ثم تصور هذه الحدوة وقد ضمنت مستطيلاً آخر يجرى عليه نفس الخطوات السابقة من التحولات، الانكماش والطي والمط، فيما يشبه عمل صانع الفطائر.



شكل ٢ - ٢ حدوة سمول: هذا الشكل للتحويل الطبولوجي يقدم أساساً لفهم خصائص الهيولية في النظم الديناميكية. القواعد بسيطة؛ فضاء يمت في اتجاه ما

(تباعداً في المسارات في فضاء الطور، تعبير عن دخول طاقة للنظام)، ثم يكتمش في اتجاه آخر (تقارب في المسارات، تعبير عن تشتت الطاقة من النظام)، ثم يطوى، وتكرر العملية بصورة مألوفة لمن له دراية بصناعة الفطائر متعددة الطبقات. يمكن لنقطتين متجاورتين في البداية أن ينتهيا متباعدين.

وهكذا جعل سمول من حدوده نوعاً فريداً من الأشكال الطبولوجية، تمثل من الناحية الرياضية ظاهرة الحساسية للظروف الأولية التي كان مقدراً للورنز أن يكتشفها خلال دراسته للطقس الجوى بعد عدة سنوات. فلو أنك اخترت نقطتين متجاورتين في البداية، فإنك لا تدري كيف يصير البعد بينهما في النهاية، بعد كل عمليات المط والطي والانكماش.

وكان سمول يأمل في البداية أن يكتفى بالمط والانكماش، دون اللجوء للطي، لفهم استقرار النظام، ولكن اتضح له أهمية الطي في تمثيل ما يعترى النظام من تغيرات طارئة. وكان شكل سمول من أوائل أنواع من الأشكال أعطت للرياضيين والفيزيائيين أداة لتصوير الإمكانيات المختلفة للحركة. من وجهة نظر معينة كان الشكل يبدو مصطنعاً بدرجة تجعله غير ذي فائدة، ولكن من جهة أخرى فقد بدا أنه شكل لاقي استحسان الرياضيين والفيزيائيين على السواء. وقد صلح هذا الشكل كنقطة للبداية، ففي خلال الستينات أحاط سمول نفسه بمجموعة من الرياضيين الشبان الذين كانوا يشاركونه الشغف بهذه الدراسة الجديدة للنظم الديناميكية. ولكن كان على عملهم أن ينتظر لعدة سنوات إلى أن يجذب انتباه مجالات الهندسية التطبيقية، وحين تحقق ذلك، أدرك الفيزيائيون أن سمول قد حول فرعاً من فروع الرياضيات إلى العالم الواقعي، لقد كان عصراً ذهبياً على حد قولهم. وقد عبر أحدهم عن هذا التطور الجذري بقوله: "حينما بدأت حياتي كرياضي عام ١٩٦٠، وهو عهد ليس بالبعيد، كانت الرياضيات البحتة مرفوضة من قبل الفيزيائيين، إذ كان بين الطرفين قطيعة كاملة. لقد تبدل هذا الوضع تماماً منذ عام ١٩٦٨؛ لقد أدرك الفيزيائيون والفلكيون والبيولوجيون بعد لأي أن أخباراً هامة في انتظارهم.



ظاهرة فلكية محيرة: إنها البقعة الحمراء الهائلة في كوكب المشتري، تظهر على سطحه كدوامة هائلة لا تتزحزح عن مكانها ولا تهدأ أبداً. لقد حيرت العلماء منذ أن بدت لأول مرة حين وجّه جاليليو تلسكوبه لهذا الكوكب، ولم تزد التحسينات في

التلسكوبات حقيقتها إلا غموضاً. وقد تعددت النظريات حولها؛ فقال البعض إنها تدفق من الحمم، ورأى البعض الآخر أنها قمر جديد في طور التكوين، وذهب رأى آخر إلى أنها جسم طاف في هواء الكوكب، وذلك حين لمح ترحزحاً طفيفاً تدريجياً في موقعها، كما قال آخرون بأنها عمود من الغازات يخرج من فتحة على سطح الكوكب، وذلك حين رأوا أن البقعة رغم تحركها، لا تبتعد كثيراً عن موقعها.

وظن الجميع أن اللغز سوف يتكشف بعد رحلة فوياجير عام ١٩٧٥، والتي أتت بالفعل بكم هائل من البيانات عنها، لكنها لم تزد العلماء إلا حيرة. فالصور كشفت عن رياح عاتية ودوامات ذات ألوان، أُصدق وصف لها أنها إعصار، إلا أنه يختلف عن الأعاصير الأرضية من عدة جهات. فأولاً يحصل الإعصار على طاقته نتيجة الحرارة التي تنبعث عندما تتحول الرطوبة إلى مطر، ولا رطوبة على المشتري. ثانياً، تدور الأعاصير في حركة حلزونية؛ في اتجاه عقارب الساعة تحت خط الاستواء وضد عقارب الساعة فوقه، وحركة البقعة ليست حلزونية، وأخيراً، وهو الأهم، تخمد الأعاصير بعد عدة أيام.

كما أن الصور بينت أن ماهية الكوكب مائعة بصفة أساسية، ليس له قلب صلب اللهم إلا إذا كان غائراً على بعد سحيق من السطح. فالكوكب أشبه بتجربة هائلة لديناميكية الموائع.

وهؤلاء الذين رأوا في الاضطرابات في ديناميكا الموائع مجرد فوضوية عشوائية، لم يكن لديهم منطق يفسر وجود بقعة من الاضطراب مستقرة بهذه الصورة. والأدهى من ذلك أن فوياجير قد أتت بتفاصيل دقيقة عن تكوين البقعة، زادت الأمر حيرة، فهي عبارة عن اضطرابات لحظية على شكل دوامات لا تدوم لأكثر من يوم، ومع ذلك فهي في مجموعها باقية مستقرة، فمن ذا الذي يضمن لها هذا الاستقرار؟

وذهب العلماء المحررون من فكرة الإعصار في دراسة الظاهرة اتجاهها آخر، ليجدوا تشابهاً مع ظواهر أخرى في دوامات الخلجان والتيارات المائية. من هؤلاء العلماء كان فيليب ماركوس Phillip Marcus من جامعة كورنيل Cornell، الذي انكب على دراسة الصور التي وزعتها وكالة ناسا للبقعة الحمراء، ثم قام بوضع نموذج للكوكب على حاسوبه الفائق، مبنى على قوانين نيوتن ومبادئ ديناميكا الموائع. ولتمثيل جو المشتري فإنه استخدم خصائص الهيدروجين والهليوم من كتلة وكثافة، مع سرعة هائلة لدوران الكوكب حول نفسه تبلغ عشر ساعات للدورة الواحدة، مما يعنى قوة طاردة مهولة تغذى تلك البقعة.

وبينما كان جو الكرة الأرضية قد مُثِّل على حاسوب لورنز البدائي، الذي كان يخرج مخرجاته على هيئة سطور من الأرقام أو أشكال رسومية بدائية من الحروف، فإن جو المشتري قد مُثِّل على حاسوب فائق القدرة، مَكَّن من إخراج البيانات على صور شرائح شفافة ثم رسوم متحركة ملونة بألوان زاهية، أخذت بلب المشاهدين حين عرضها. إنه نظام ذاتي الضبط، يُخلق وينظم عن طريق الظواهر اللاخطية ذات الاعتمادية المتبادلة، إنه نظام هيولي مستقر "تدفق هيولي يمتص الطاقة كما الإسفنج" على حد قول ماركوس.

لقد تعود حين كان طالبا في مجال الفيزياء أن يتعامل مع الظواهر الخطية، معتبرا أي اضطراب يعتريها مجرد خطأ من مصدر خارجي يجب إهماله. ولكنه خلافا لأقرانه الفيزيائيين كان قد استوعب درس لورنز، أن النظم التحديدية يمكن أن تنتج ما هو أكثر من ظواهر منضبطة، وتعلّم أن ينظر إلى الاضطراب من خلال نظرة أعمق، وأن يرى بداخله جزرا من الهياكل، وقد طبق هذا المنطق على بقعة المشتري الحمراء، على أساس أن النظم المعقدة يمكن أن تخرج ظواهر من الاضطراب المستقر والمتماسك. كان يتبع تقليدا حديثا يستخدم الحاسوب كأداة للاختبارات، ويرضيه أن ينظر إلى نفسه كطراز فريد من العلماء، ليس مجاله أساسا هو الفلك، أو ديناميكا الموائع، أو الرياضيات، بل إن مجال تخصصه هو الهيولية.

أ أوضح مثال لموقف العلم التقليدي من الثورات العلمية ما حدث بخصوص النظرية الكمية والنظرية النسبية في مطلع هذا القرن. فقد قدم ماكس بلانك نظرية الكمية في ديسمبر عام ١٩٠٠، ولم يفز بجائزة نوبل عنها إلا عام ١٩١٧، أما أينشتاين فلم يحز على نظريتي النسبية الخاصة والعامة بجائزة نوبل على الإطلاق، بل حازها عام ١٩٢١ عن تطبيقه للنظرية الكمية في أبحاث الضوء. ويعتبر عدم فوزه عن نظريتيه اللتين تعتبران بلا جدال أعظم فتح علمي في تاريخ البشرية أمرا يؤخذ على العلم التقليدي في مواجهة الأفكار الثورية والمتجددة - المترجم

ii وصلة مكونة من حاجز ضئيل بين مارتين شبه موصلتين - المترجم

iii سوف تعرض هذه الظاهرة تفصيليا عند الحديث عن طريقة نيوتن (الفصل الثامن)، وكذا تُبيّن بوضوح في اللوحة الخاصة بذلك - المترجم

iv يستخدم المترجم كلمتي: تشويش، شوشرة، كمترادين مقابل كلمة noise، وليس من فرق في استخدامهما إلا ما قد يوحي به السياق - المترجم

- v كان ذلك حينما أراد تحليل نظام فلكي يجمع بين ثلاثة أجرام تدور مع بعضها البعض، وكانت دهشته بالغة حين وجد النظام مستعص على التحليل الرياضي، حيث يصعب تماما متابعة تبادل الطاقة بين الأجرام الثلاثة، بل قد يحدث أن يستبد أحد الأجرام بالقدر الأعظم من الطاقة الكلية للنظام فينتقل في الفراغ بقوة قد تقذف به خارج المجرة بأكملها، ويطلق على هذه الظاهرة ظاهرة "المقلاع" `slangshot` (تساعل البعض عن احتمال أن تلقى الأرض يوما ما هذا المصير، ولكن الدراسات حتى الآن مطمئنة، فلاحتمال يبدو بعيدا للغاية) - المترجم
- vi يقصد بذلك قضاء الطور، وسوف يزيد المؤلف هذا الموضوع إيضاحا بعد قليل عند حديثه عن حدود سمول. المترجم
- vii جهاز ذو شاشة كشاشة التلفزيون، تظهر عليها الإشارات الكهربائية - المترجم
- viii سوف يعود المؤلف للحديث عن هذه الظاهرة في الفصل الرابع-المترجم
- ix لمزيد من توضيح الموضوع يراجع تطبيق هينون لهذا الأسلوب في الفصل الخامس. المترجم

الحياة صعود وهبوط²⁰

أسماك مفترسة، وعوالق مائية شهية، غابات مطيرة تعج بزواحف لا حصر لها، وطيور تنزلق في الهواء تحت ظلة من الأغصان المورقة، حشرات تطن، قوارض تتكاثر في دورات من انتشار ثم انكماش رباعية السنوات في ظل صراع على البقاء لا يعرف الرحمة. إن العالم يصنع معملاً بيئياً هائلاً، تتفاعل في مرجه خمسة ملايين نوعاً من الكائنات، أو لعلها خمسون مليوناً؟ لا أحد من البيئيين يعرف على وجه الدقة.

لقد وضع البيولوجيون من ذوى التفكير الرياضى في القرن العشرين مجالاً علمياً مستحدثاً، هو البيئة، يجرّد الحياة من ظلالها واضطراباتها، ليعالج قضية التناسل فيها كنظام ديناميكي. فهم يستخدمون الوسائل الأولية للفيزياء والرياضة لوصف الزيادة والانكماش في تعداد الأجناس، حين تتكاثر في ظل بيئة محدودة المصادر الغذائية، وغنية بالأعداء الطبيعيين واحتمالات الأوبئة. هذا النظام البيئى المجرد إذا لم يكن في الإمكان عزله عن الواقع فعلياً، فهو قابل لذلك فى أذهان العلماء.

حين ظهر علم الهىولية فى السبعينات، كان قدر البيولوجيين أن يلعبوا فيه دوراً خاصاً. كانوا يستخدمون نماذج رياضية، ولكنهم يعلمون أيضاً أن مثل هذه النماذج لا تمثل الواقع إلا بقدر كبير من التقريب. وبعبارة أخرى، فإن إدراكهم بمدى عدم دقة النماذج فى تمثيل الواقع، قد دفعهم إلى الأخذ بعين الاعتبار ما لدى الرياضيين فى تمثيل الشذوذ عن الأنماط التجريدية. فإذا كانت المعادلات المنضبطة يمكن أن تصف التصرفات غير المنضبطة، فإن هذا يمس لديهم وتراً حساساً. إن المعادلات التى وضعت لدراسة التكاثر البيولوجى هى المقابلة لما يستخدم لدى الفيزيائيين لوضع النماذج التى تصف كونهم، على أن حيود الحياة الواقعية عن النماذج البيولوجية تجعل من هذه النماذج مجرد تصوير كاريكاتيرى للحياة بتعقيداتها، بالضبط كما تكون نماذج الاقتصاديين، وعلماء السكان، ومخططى المدن، وعلماء النفس، حين يحاولون وضع أساس رياضى قوى لوصف هذه العلوم الهلامية بطبيعتها. وبالنسبة

للبيولوجيين، حتى نموذج لورنز بمعادلاته الثلاث كان معقدا أكثر مما يجب؛ ثلاثي الأبعاد، متغير على الدوام، عصي التحليل.

واستدعت الحاجة وضع أسلوب آخر للعمل في مجال البيولوجيا. إن الفيزيائي حين يبحث عن معادلة تصف تصرف الحالة قيد الدراسة، إما أنه يجدها في بعض المراجع، أو يستنبطها من المبادئ الأولية. لنفرض أن الحالة هي بندولان مرتبطان عن طريق زنبرك، إنه يعلم تماما عن البندول، وعن الزنبرك، وهو وضع غير متاح للبيولوجي، فليس من المتصور له أن يستنبط المعادلة التي تحكم الظاهرة قيد البحث من مجرد التفكير في أسلوب تكاثر الكائن الذي يتناوله. إنه مضطر للحصول على كم كبير من البيانات، ثم يعمل الفكر حول طبيعة المعادلة التي تخرج النتائج التي حدثت بالفعل؛ ماذا يحدث لو وضعنا ألف سمكة من نوع كذا في بركة محدودة الموارد الغذائية؟ وما يحدث لو أضفنا لها عددا من أسماك القرش، تلتهم سمكتين في اليوم؟ ما الذي يحدث لفيروس يقتل بمعدل معين وينتشر بمعدل معين اعتمادا على حجم الأفراد من الكائنات؟ يحاول العلماء وضع أسئلة كهذه في صورة مجردة مثالية، حتى يمكنهم التطبيق على معادلات صماء.

وقد تنجح هذه الوسيلة، فقد عرف علماء البيولوجيا شيئا عن تاريخ الحياة، كيف تفاعلت الحيوانات المفترسة مع فرائسها، كيف يتأثر عدد السكان بانتشار وباء ما. فإذا ما انفجر التعداد في نموذج رياضي ما، أو وصل لحالة التوازن، أو انتهى للانقراض، فغالب الظن أن مآل التعداد الحقيقي سوف يتصرف بنفس الطريقة.

ومن آليات التبسيط المفيدة نمذجة العالم على أساس دراسة التغيرات في فترات من الزمن، بدلا من متابعتها لحظة بلحظة، كما هو الشأن في المعادلات التفاضلية. وبينما تشتهر المعادلات التفاضلية بالصعوبة، نجد أن المعادلة المعروفة باسم معادلة الفروق اللوجستية (التي سوف نتناولها بالشرح حالا) أبسط وأكثر ملاءمة في الاستخدام لعمليات تقفز على مر الزمن من حالة لأخرى. ولحسن الحظ، تتصرف غالب الكائنات في دورات قوامها سنة تامة، كأن تتزاوج في فصل معين. فلمعرفة العدد المتوقع في العام القادم من حشرة ما، قد يكفي أن تعرف العدد هذا العام.

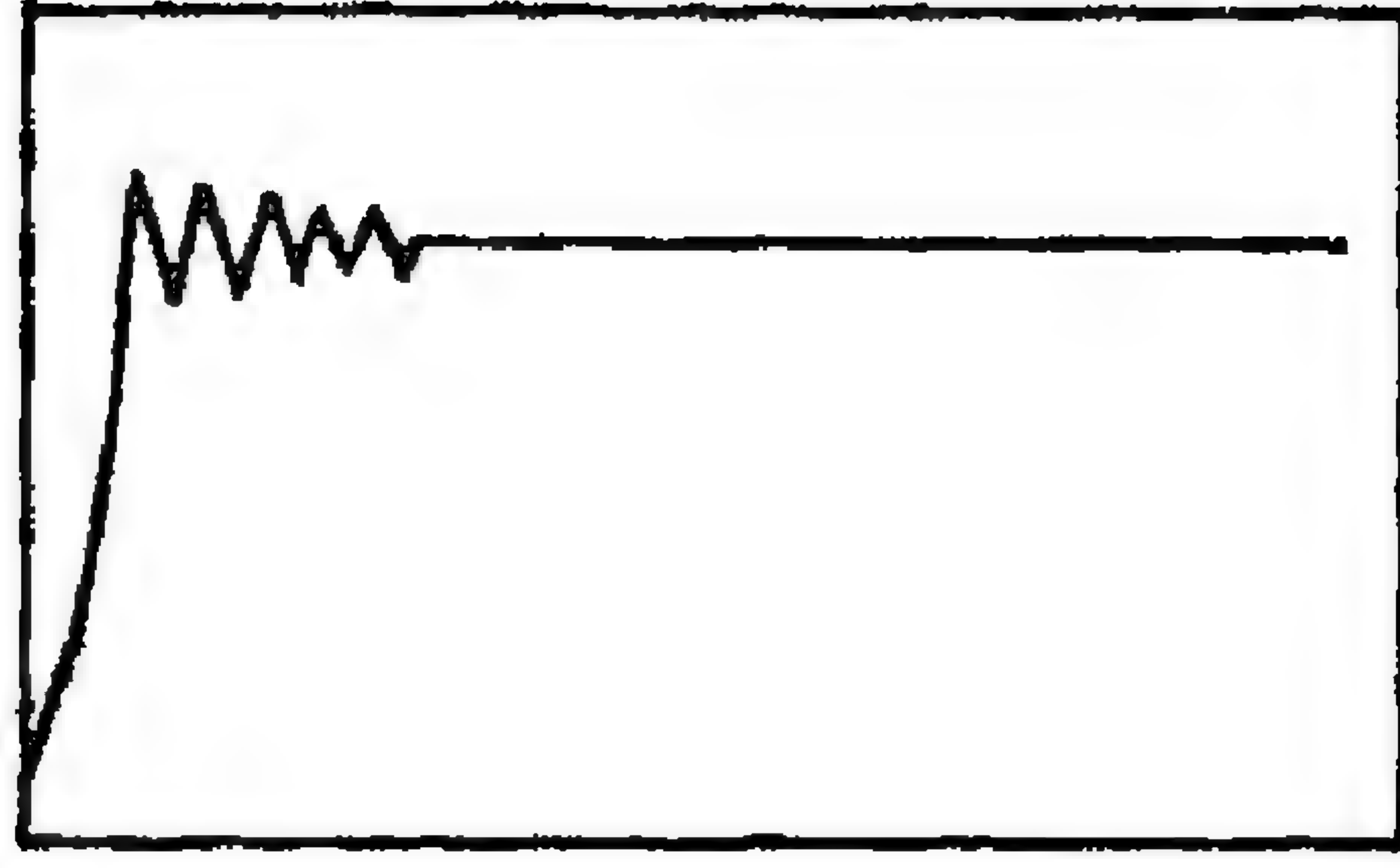
يمكن الوصول في التبسيط إلى درجة تصور التزايد في الأعداد على أنه يجري بصورة خطية، أي مطردة بمعدل ثابت. في هذه الحالة تكون المعادلة على الصورة: $S = M \times S$ ، حيث S التعداد في العام المقبل، S التعداد هذا العام، و M هو معدل التزايد، وليكن مثلا ١,١، فإذا كان التعداد هذا العام ٢٠٠٠٠ يكون في العام المقبل

٢٢٠٠٠ من الواضح ما فى هذا التبسيط من سذاجة، يسير فيه التكاثر مطّرداً أشبه بمبلغ يوضع فى بنك ليتزايد للأبد.^(١)

إن تطويراً أكثر واقعية للمعادلة يمكن أن يأخذ فى الحسبان مُعدل الوفيات الطبيعي، ثم معدل الوفيات نتيجة الافتراض أو المجاعات نتيجة التزايد الضخم. قد نتصور معادلة على النحو التالي: $ص = م \times س (١ - س)$.^أ تلاحظ هنا أن الرمز $س$ حين يكبر، فإن المقدار $(١ - س)$ سوف تقل قيمته، ولم يعد التكاثر بذلك مطرداً بانتظام كالحالة السابقة. ويمكن للقارئ أن يجرى بعض التطبيقات على آلة حاسبة بسيطة، بأن يأخذ مقداراً ابتدائياً للرمز "س"، وليكن ٠,٢، وللمعدل، وليكن ٠,٧. سوف يجد القارئ أن التعداد قد استقر حول رقم يتراوح صعوداً وهبوطاً حول متوسط هو ٠,٦٣، وفى وقت الحساب اليدوي، قبل الآلات الحاسبة، لم يكن بالمستطاع الوصول إلى مستوى أكبر فى إجراء العمليات الحسابية.

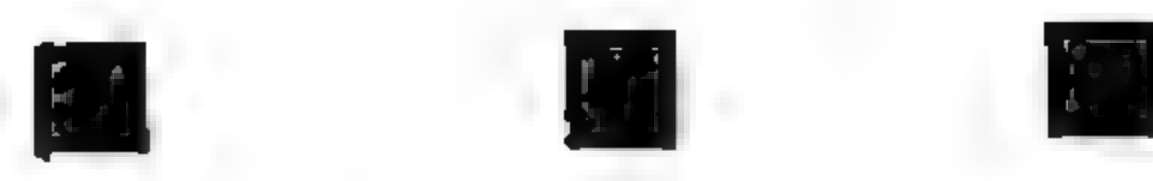
وبحلول الخمسينات، كان البيولوجيون يبحثون عن صور معدلة لهذه المعادلة، والتي عُرِفَت باسم معادلة الفروق اللوجستية^أ logistic difference equation. فهي قد طُبِّقَت فى استراليا على مزارع السمك. لقد عرف البيولوجيون أن العامل "م" له أهمية بالغة فى النموذج، وهو يماثل فى المعادلات الفيزيائية المقابلة شيئاً مثل كمية الحرارة، مقدار الاحتكاك، أو مقادير أخرى ليست جامدة الماهية، باختصار، ذات طبيعة لاختية. وفى النظم البيئية قد يمثل هذا العامل خصوبة النوع. ويظل التساؤل قائماً حول مدى تأثير مثل هذه العوامل على المصير النهائى للجنس. والإجابة الواضحة هى أن مقداراً صغيراً للعامل "م" سوف يجعل الجنس يستقر على مستوى صغير من التعداد. ولكن اتضح أن هذا لا ينطبق على كافة العوامل، لقد وجد بعض الباحثين أنه مع مقدار أكبر لبعض العوامل، تتحول الحالة إلى الهولوية.

بصورة غريبة، تأخذ الأرقام طبيعة شاذة، فهي تبدو مشوشة عند إجراء الحساب يدوياً. لا ترتفع الأرقام إلى ما لا نهاية بالطبع، ولكنها أيضاً لا تستقر عند مستوى ثابت. ولا يتصور أن يكون لدى باحث يجرى الحسابات يدوياً لا الرغبة ولا المقدرة فى الاستمرار فى إجراء عمليات حسابية تفرز أرقاماً لا تبشر بالاستقرار عند وضع ثابت. كل ما تصوره البيولوجيون هو أنه إذا كانت الأرقام تتأرجح بهذه الصورة، فإنها لا بد تفعل ذلك حول رقم توازن معين، فلم يخطر على بال أحد أن مثل هذا التوازن غير موجود.



شكل ٣ - ١ تعداد يستقر على حالة التوازن بعد ارتفاع مفاجئ ثم عدة اهتزازات مرحلية.

لم تعترف المراجع البيولوجية بإمكان ظهور حالة الهيولية في نظمها، ليس طبعاً لعدم الاعتراف بأن هذه النظم قد تتصرف أحياناً بطريقة شاذة، ولكن من منطلق تصور أن هذا الشذوذ لا علاقة له بالنماذج الرياضية الموضوعة، أو يفترض وجود عوامل أخرى لم تؤخذ في الحسبان، كالتوزيع العمري، أو نسبة الجنسين، أو عوامل أخرى جغرافية أو بيئية. أو ربما يرجع السبب إلى عدم الدقة في آلة الحساب. كان تصور الوضع النهائي المستقر هو المسيطر على الذهن في كافة الأحوال. وفي كافة الأحوال، فإن الأسلوب نفسه لم يكن مثيراً، فليس في رغبة أحد إضاعة الوقت في حسابات لا تفرز ظواهر مستقرة، فالنظام هو بغية البحث العلمي الأولى. خاصة وأنه ما من أحد من الباحثين إلا ويدرك أن نموده ليس إلا تقريباً فجاً للنظام الواقعي، فما الهدف من إفاضة البحث فيه؟



بعد ربح من الزمن، ردد الناس أن جيمس يورك James York، من معهد العلوم الفيزيائية والتكنولوجيا Physical Science and Technology بجامعة ماريلاند، والذي رأسه فيما بعد، هو الذي اكتشف معادلات لورنز، وأنه هو من أعطى علم الهيولية اسمه، والشق الثاني من المقولة صحيح.

كان يورك رياضياً يعجبه أن ينظر إلى نفسه كفيلسوف، رغم خطورة مثل هذا الظن على مستقبله المهني. كان يضمّر الإعجاب بسمول، ولكنه، كالكثيرين، يرى أنه من الصعب أن يسبر غوره، ولكنه على خلاف الكثيرين يعرف السبب لذلك. كان من نوع من

الرياضيين يرى أنه من الواجب أن يضع أفكاره موضعاً يستفاد منها فيه، فقدم تقريراً عن انتشار مرض السيلان أقنع الحكومة الفيدرالية بتعديل خطتها في مواجهة هذا المرض، كما قدم شهادة علمية حول خطة مقترحة للحد من مبيعات البترول انتهى فيها (دون أن ينجح في الإقناع) بأنها سوف تزيد الوضع تفاقمًا. وفي عصر المظاهرات المضادة للحرب، قام بتحليل صورة قتل إن المخابرات قد التقطتها بالطائرة لمظاهرة حول البيت الأبيض، أثبت فيه أن الصورة قد التقطت بعد نصف ساعة من انفصاضها.

وفي المعهد كان يورك يستمتع بالأبحاث غير التقليدية، ويلقاء العلماء من المجالات العلمية الأخرى. وفي عام ١٩٧٢ عثر أحد المشتغلين بالنظم الديناميكية على بحث لورنز الذي وضع عام ١٩٦٣ باسم "التدفق اللادوري التحديدي *Deterministic nonperiodic Flow*" فأعجب به لدرجة أنه قام بتوزيع نسخ منه على كافة معارفه من العلماء، ومنهم يورك.

كان عمل لورنز ساحراً، يبحث عنه يورك دون أن يعلم به. كبداية، كان بمثابة صدمة في الرياضيات، نموذج هيولي يخرج عن تقسيم سمول الأول للنظم. ولكنه لم يكن رياضياً صرفاً، بل كان له مدلول فيزيائي، صورة لحركة الموائع، أدرك على التو أنه يود أن يراه الفيزيائيون. لقد وجه سمول الرياضيات إلى المسائل الفيزيائية، ولكن يورك كان يدرك أن لغة الرياضيات تقف عقبة في التواصل بين الطرفين. أه لو كان العالم العلمي يضم غرفة تجمع تجمعاً من الفيزيائيين والرياضيين، ولكنه لم يكن به شيء من ذلك. وحتى بعد أن بدأ سمول في تقريب الفجوة، فقد ظلت للرياضيات لغتها وللفيزياء لغتها. الرياضيات تثبت النظريات عن طريق التحليل المنطقي، والفيزياء تثبتتها عن طريق التجارب العملية. حتى سبب وجود العلمين مختلف، والأمثلة التي تضرب فيهما مختلفة.

بلغ من إعجاب يورك بالبحث أنه أرسل منه نسخة إلى سمول، الذي استثاره بدرجة بالغة أن يجد لورنز قد اكتشف نظاماً هيولياً كان يظن ألا وجود له، فقام بنشر نسخ منه بقدر استطاعته. ولما كان يورك قد وضع عنوانه الشخصي على البحث، فقد كان ذلك سبب الاعتقاد بأن يورك هو من اكتشف ذلك البحث.

شعر يورك أن الفيزيائيين قد تعلموا ألا يروا الهيولية. إن الحساسية للظروف الأولية تقع في كل مكان. رجل يخرج من منزله متأخراً لثلاثين ثانية، فتسقط زهرية متجاوزة رأسه بعدة مليمترات، وبعد قليل يقتل تحت عجلات سيارة طائشة. أو لنجعل الأمر أقل مأساوية، فنتصور أنه قد فشل في اللحاق بباص يمر كل عشر دقائق، مما تسبب أن يفوته قطار يمر كل ساعة. إن لاعب البيسبول يعلم أن الاختلاف الطفيف في توجيه

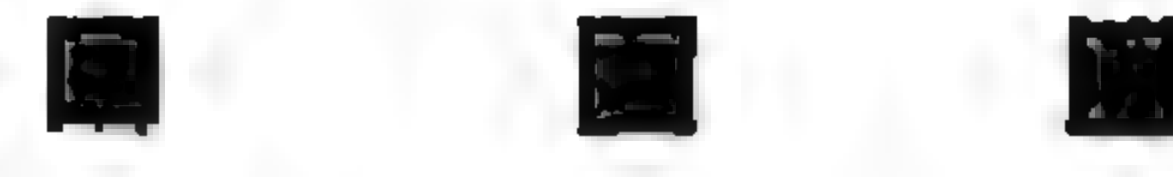
الضربة لا ينتج عنه اختلاف طفيف في النتيجة. إن البيسبول لعبة تحكم بالبوصات، ولكن العلم ليس على هذه الشاكلة.

ومن الوجهة التعليمية، فإن قدرا كبيرا من الفيزيائيين والرياضيين يقضون وقتاً لا بأس به يكتبون معادلات تفاضلية ويعلمون طلابهم كيف يحلونّها. والمعادلات التفاضلية تُعامل التغير في الزمن كمتصل، وليس كفترات مجزأة. ومن المعروف أن هذه المعادلات صعبة الحل، ولكن على مدى قرنين ونصف تعلم العلماء قدرا هائلاً من الأنواع القابلة للحل، مضمنة في المراجع والكتب التعليمية مع طرق حلها، حتى غاب عن الأذهان حقيقة علمية، هناك من هذه المعادلات ما هو غير قابل للحل. ويقول يورك: "إنك حين تستطيع إيجاد حل لمعادلة تفاضلية، فإنك على التو تستبعد حالة الهولوية". فالنظم القابلة للحل هي التي تحتويها المراجع العلمية، وهي منضبطة حسنة التصرف. فإذا ما واجه العلماء حالة من اللاخطية، فإنهم إما أن يُقربوها إلى الحالة الخطية، أو يبحثوا عن أساليب للالتفاف حولها. فالمراجع العلمية كانت تضم في الواقع ما يعتبر حالات خاصة من النظم، لا تتعامل مع الحساسية للظروف الأولية. كانت النظم اللاخطية، والتي تؤول إلى حالة الهولوية، نادراً ما يشار إليها في مجال التدريس. فإذا ما ووجهت مثل هذه الحالات، وبالطبع كثيراً ما كانت تواجه، فإن الدارسين تعلموا كيف يهملونها كنوع من التشويش. قليل هم من فهموا أن روح النظم الطبيعية تكمن في اللاخطية.

كان منهم يورك: "الرسالة الأولى هي أن اللانظام موجود. يريد الفيزيائيون والرياضيون أن يتعاملوا مع النظام، ولكن عليهم أن يفهموا اللانظام إذا ما أراوا أن يتعلموا كيف يواجهونه. إن مهندس السيارات الذي لا يعرف كيف يتعامل مع الشاذ من الأمور كالرواسب الملتصقة بالصمامات لن يكون مهندساً كفئاً" فالعلماء وغير العلماء على حد سواء، من وجهة نظر يورك، سوف يضللون أنفسهم إذا لم يطوعوها على التعامل مع اللانظام. لماذا يرى الاقتصاديون أن هناك تغيراً ثورياً في الأسعار؟ لأن الدورية هي أقصى ما يتصورون فهمه من تعقّد، فإذا ما اختلت الأسعار بصورة شاذة، فإنهم يظلون يبحثون عن نوع من الدورية مشاب ببعض الشفوذ. وإذا ما واجه الفيزيائيون نفس الموقف مع نتائج تجاربهم، فإنهم يعزّون ذلك إما لتداخل خارجي مع التجربة، أو لأخطاء كامنة فيها.

رأى يورك أن هناك رسالة في أعمال لورنز وسمول لا يستمع لها الفيزيائيون. ومن ثم فقد كتب بحثاً في أوسع مجلة يمكن أن يخاطبها انتشاراً؛ مجلة الرياضيات الأمريكية الشهرية *The American Mathematical Monthly*. (كعالم في الرياضيات كان من الصعب عليه التعامل مع مجلات خارج هذا التخصص، ولم يتعلم إلا بعد عدة

سنوات كيف يفعل ذلك). كان بحثه له قيمته في حد ذاته، ولكن الشيء المثير فيه كان عنوانه الذى اختاره بنية توليد أكبر قدر من الإثارة: "الدورة الثلاثية تعنى هيولية *Period Three Implies Chaos*". وقد نصحه بعض أصدقائه أن يختار عنوانا أكثر رصانة، ولكن يورك أصر على الكلمة التى تعبر عن مجال الانظام المحكوم، كما تحدث فى نفس الوقت مع صديقه البيولوجى، روبرت ماى Robert May.



كان ماى قد دخل علم البيولوجيا من باب خلفي. لقد كان فى البداية فى موطنه الأصيل بسيدنى، استراليا، عالما فيزيقيا، وكان بحثه بعد الدكتوراه فى الرياضيات التطبيقية. وقد توجه لمعهد الدراسات المتقدمة فى برنستون للقيام بأبحاث لمدة عام، ولكن بدلا من أن يقوم بما جاء من أجله وجد نفسه منساقا للقاء البيولوجيين فى جامعة برنستون، التى قرر الالتحاق بها نهائيا، ووصل فيها إلى منصب عميد الدراسات.

وحتى هذه الفترة، كان البيولوجيون عازقين عن الخوض فى الرياضيات بما هو أبعد عن مبادئ التفاضل والتكامل، أما عاشقو الرياضيات ومن لهم بها تذوق فكانوا يتجهون بداية إلى الرياضيات أو الفيزياء. وكان ماى استثناء، كان اهتمامه فى البداية منصبا على مسائل التوازن والتعقد التجريدية، والتفسير الرياضى لكيفية التوازن بين المتنافسين. ولكنه بالتدريج بدأ ينساق إلى القضايا البيولوجية البسيطة، مثل مآل تعداد جنس معين على مدى الزمن. ولكن النظم المبسطة بينت أنها غير مجدية. وكان قد قضى وقتا فى دراسة معادلة الفروق اللوجستية، مستخدما أساليب التحليل الرياضى وآلة حاسبة بدائية.

كانت هذه المعادلة تشغل باله فى الواقع منذ كان فى موطنه الأصيل، لدرجة أنه كتبها على سبورة فى أحد ممرات الكلية التى عمل بها كتدريس لطلابه. كان السؤال الذى يلح عليه مرتبطا بمدى تأثير عنصر اللاخطية فى المعادلة، وقد وجد أن زيادة هذا العنصر لا يغير فقط فى القيم الكمية للنتائج، بل فى نوعيتها أيضا، بمعنى أنه لن يغير فقط فى المستوى الذى يصل عنده توازن التعداد، بل يحدد إن كان هذا التوازن سوف يحدث أصلا.

لقد وجد أنه عندما يكون معامل اللاخطية صغيرا، فإن النظام سوف يستقر على حالة معينة، وحينما يكبر، فإن الحالة تنقسم إلى حالتين يتردد بينهما النظام، ولكن عند قيمة أكبر من ذلك، فإن النظام يتصرف بطريقة شاذة، لماذا؟ ما هى الحدود بالضبط

بين هذه الصور من التصرفات؟ لم يجد أجوبة شافية عن هذه التساؤلات (ولا طلبته بطبيعة الحال).

وضع ماى برنامجا مكثفا لدراسة رقمية لتصرفات هذه المعادلات البسيطة، تماثل ما قام به سمول. كان يحاول فهم هذه المعادلة البسيطة فهما شاملا، وليس مُجزّأ. كانت معادلاته أبسط بمراحل من أى شيء قام سمول بدراسته، وكان من المتصور أن تكون إمكانيتها على خلق النظام وعدم النظام قد استهلكت منذ أمد، ولكنها لم تكن كذلك. لقد كان برنامج ماى فى الواقع مجرد بداية. لقد جرب مئات من قيم ذلك المُعامل، مُدخلاً عنصر التغذية الخلفية، لينظر ما إذا كانت الأرقام سوف تستقر عند نتيجة معينة، ومتى يكون ذلك. كان الأمر كما لو كان لديه بركته الخاصة للأسماك، يمكنه أن يتلاعب فى عملية تكاثرها وانقراضها. كان يغير من المعامل ببطء شديد، مثلا من ٢,٧ إلى ٦,٩٢, وعند تغيير طفيف فى المعامل، يتلاحظ تغييرا طفيفا فى التعداد، فيزحزح ماى الخط المعبر عن النتيجة بمقدار التغير الحادث.

وفجأة، عندما يتجاوز المعامل قيمة ٣، وجد ماى أن الخط قد انقسم إلى قسمين، فأسمাকে التخيلية ترفض الاستقرار عند مستوى معين، بل تتأرجح بين قيمتين فى السنوات التالية. ومع قيمة أعلى قليلا، تنتشعب الحالات إلى أربع، تعود كل حالة عند السنة الرابعة. مرة أخرى كان التصرف الدورى مستقرا، مرة عند سنة، ثم عند سنتين، ثم عند أربع.

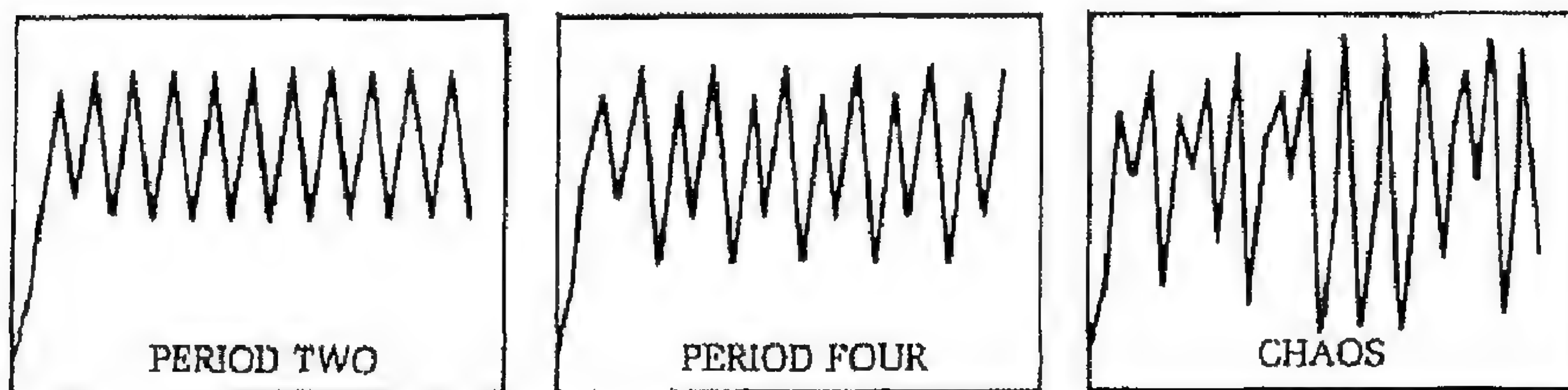
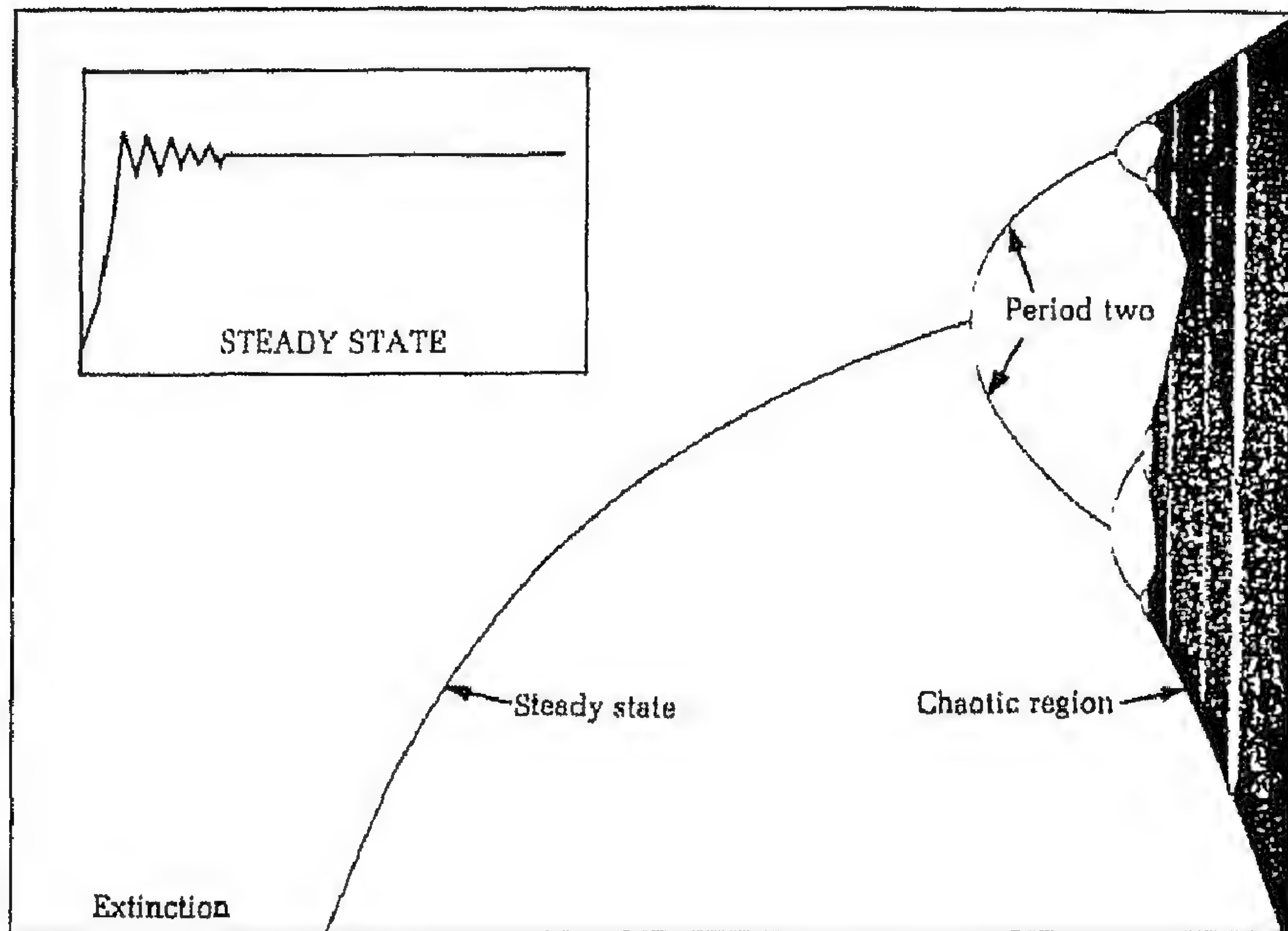
وكما فعل لورنز منذ عشر سنوات، أدرك ماى أنه يجب وضع نتائجه على شكل بياني. فقام بوضع قيم المعامل على الإحداثى الأفقى، ثم وضع قيمة التعداد الذى يكون عنده التوازن على الخط الرأسى. ورسم الشكل منحنى يرتفع ببطء، ثم عند تجاوز النقطة الحرجة الأولى، كان الخط ينقسم إلى خطين، ممثلا تعدادا له مستويان من التوازن عند دورة من مزدوجة بين عامين.

وتدرجيا بدأ هذا التشعب الثنائى يتزايد، عند قيم ٤، ٨، ١٦، ٣٢،، وفجأة، عند نقطة معينة، يختفى التشعب لتكون حالة الهىولية، التغيرات التى لا تعرف استقرارا. لقد اسودت المنطقة بأكملها نتيجة تكّس النقاط. ولو كنت متتبعا تعداد النوع فى بيئة طبيعية، لظننت أنه لا يستقر أبدا بسبب تدخل بيئى خارجى.

ولكنه لاحظ أيضا أنه خلال هذا التعقد، تظهر فجأة حالة دورية جديدة، كناقذة فُتحت خلال ذلك الظلام، وبدورات شاذة، كأن تكون كل ثلاث سنوات أو سبعة، بعدها

يبدأ التشعب الثنائي بإيقاع أسرع، كأن يكون ٣، ٦، ١٢ أو ٧، ١٤، ٢٨.... إلى أن تظهر حالة الهولوية من جديد.

بداية، لم يكن ماى قادرا على رؤية هذه الصورة الشاملة، ولكن الأجزاء التى كان بإمكانه حسابها كانت مزعجة بما فيه الكفاية. فى الحياة الواقعية لا يلاحظ الإنسان إلا صورة واحدة، تماثل إحدى النقاط على المحور الرأسى، ربما تعداد مستقر، وربما دورة ثلاثية، وربما عشوائية تامة. ليس للمراقب أن يدرك أنه بتغيير فى قيمة معامل ما سوف يتصرف النظام بصورة مخالفة تماما.

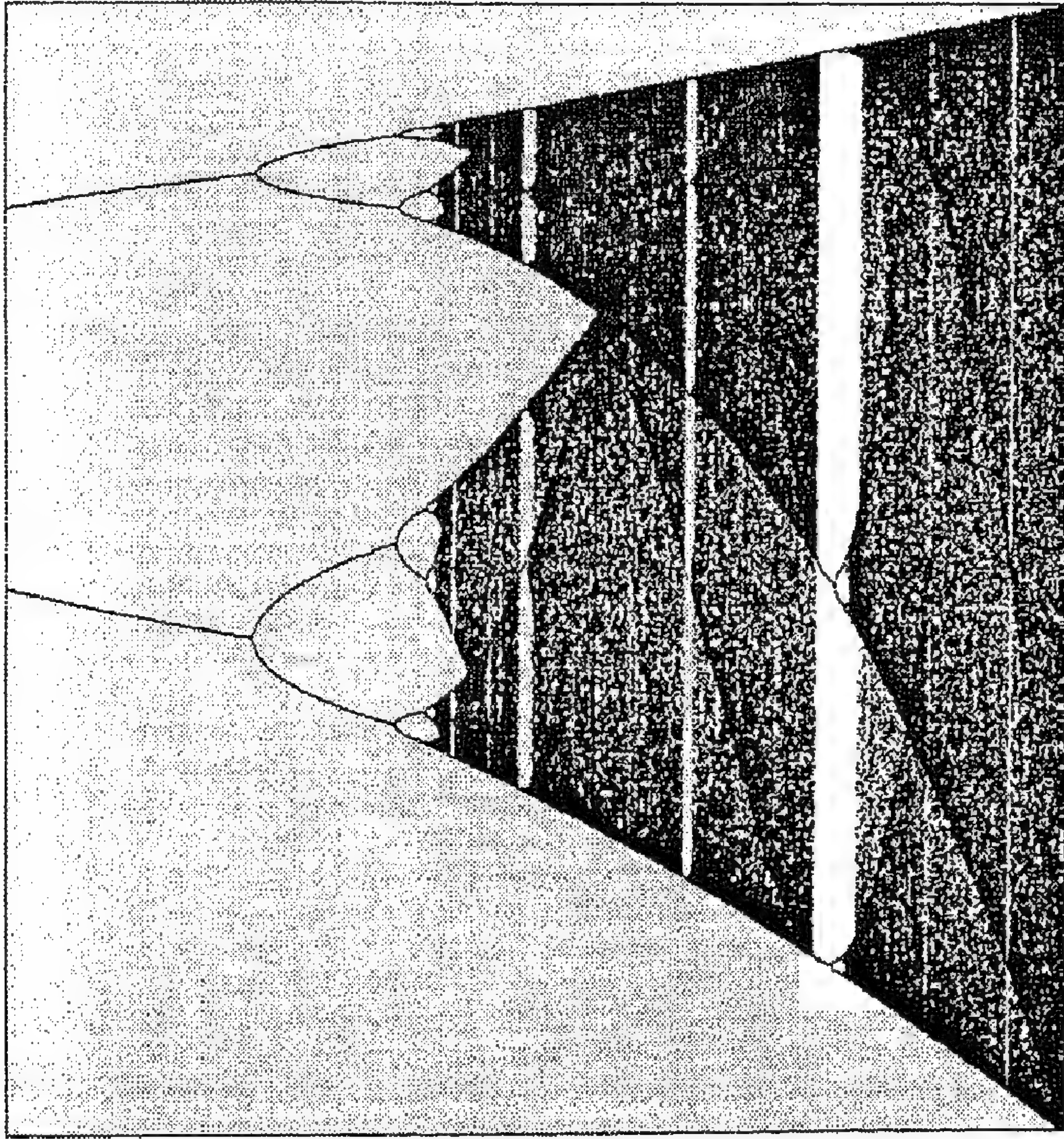


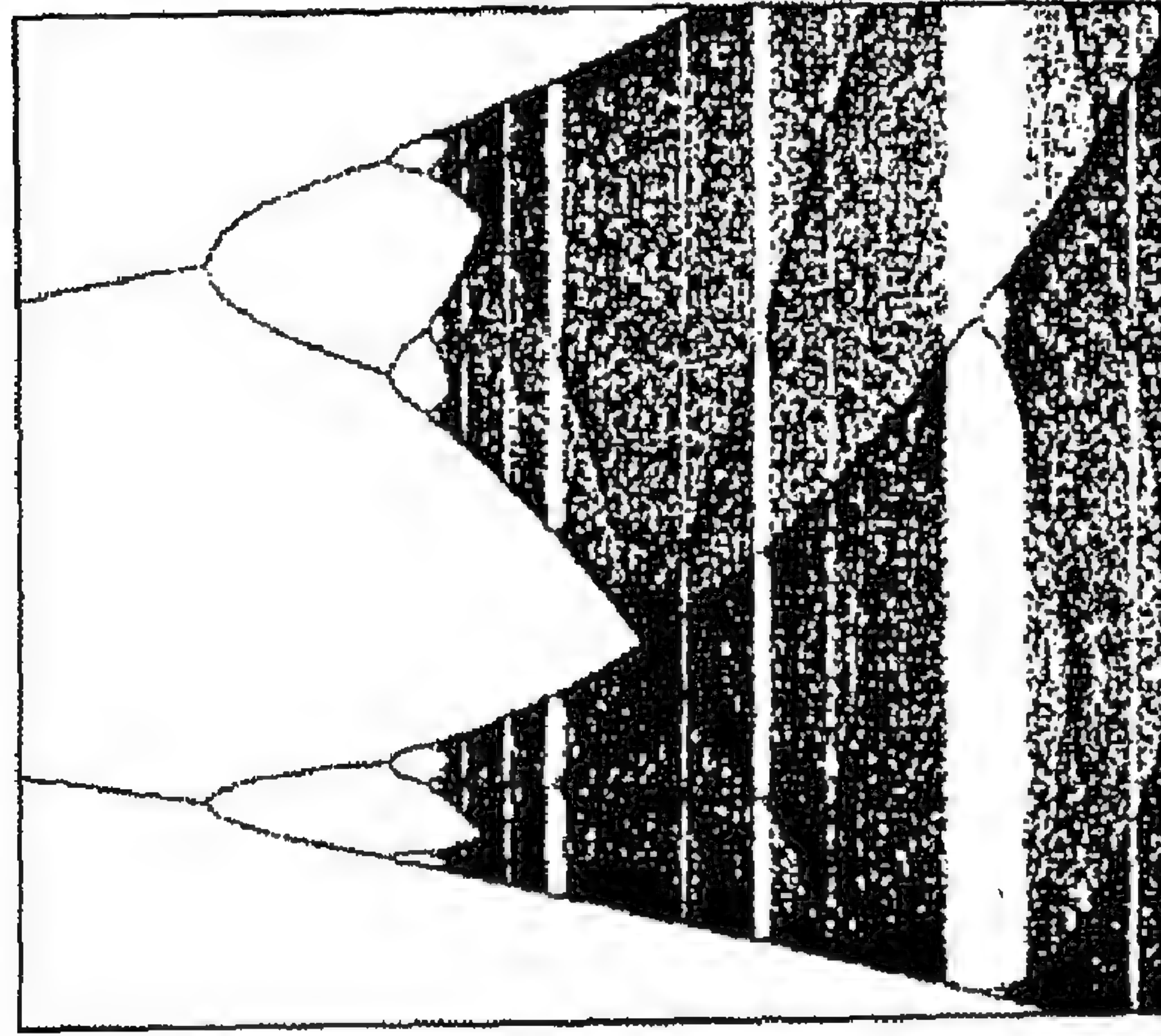
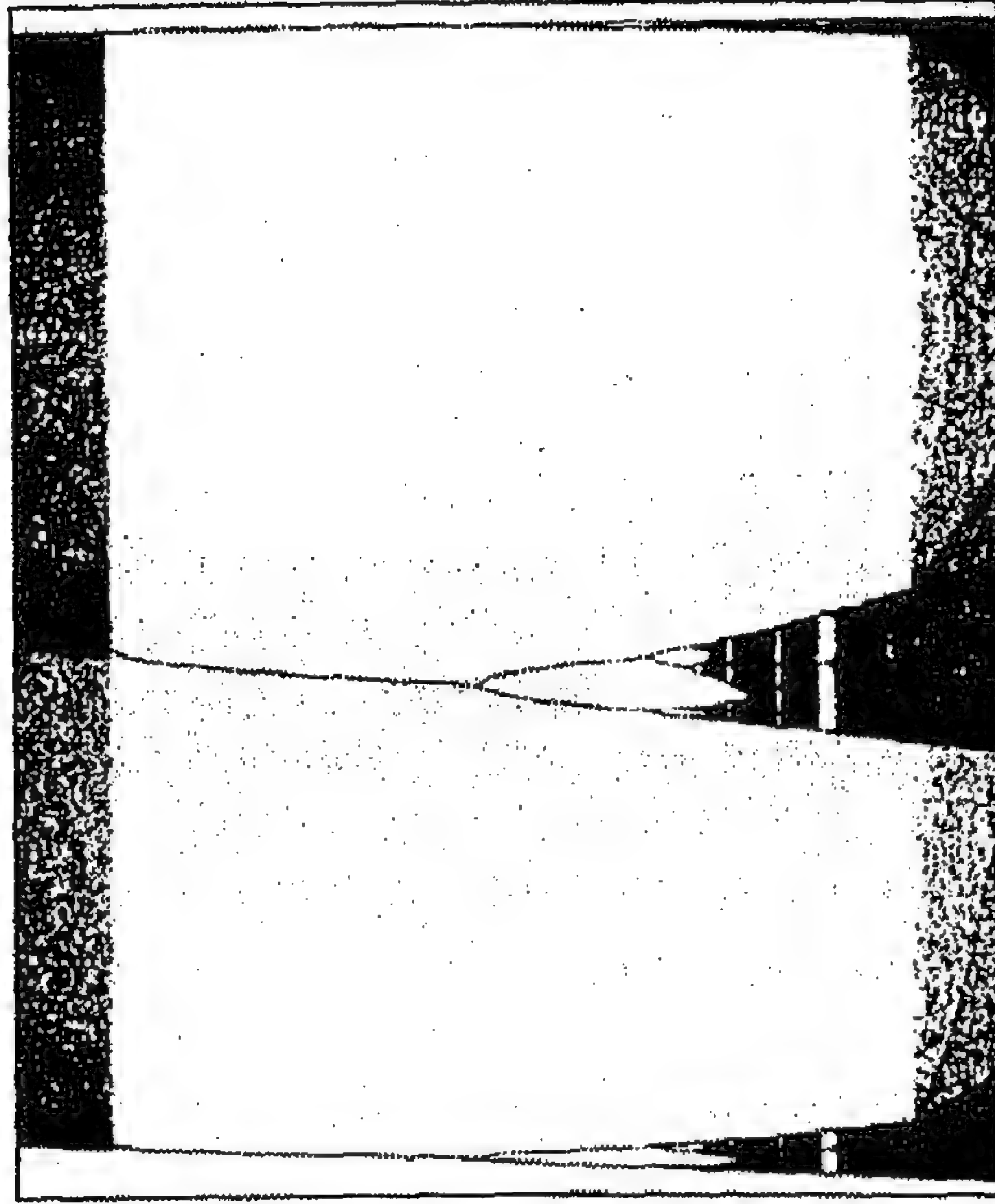
شكل ٣ - ٢ تضاعف الفترات والهولوية: بدلا من استخدام أشكال تُبين تصرف التعداد عند درجات مختلفة من الخصوبة، استخدم روبرت ماى وغيره من العلماء "شكل التفرع الثنائي" لتجميع كافة البيانات على شكل بيانى واحد.

يُبيّن الشكل كيف يتسبب تغير في المعامل «م» في تغيير التصرف النهائي لنظام بسيط. تمثل قيم المتغير من اليسار لليمين، ويمثل التعداد النهائي على المحور الرأسي. وبمفهوم معين، يتسبب تزايد المعامل في تحفيز النظام بدرجة أكبر، مما يترتب عليه زيادة اللاخطية.

حين يكون المعامل صغيراً (يسار)، ينقرض النوع. ومع ارتفاع المعامل، يميل التعداد للتوازن. ومع استمرار الارتفاع، يتذبذب التعداد بين مستويين، بالضبط كما تتسبب زيادة الحرارة في عدم استقرار تيارات الحمل في السائل. بعد ذلك تتوالى ظاهرة الانقسام، أو التفرع الثنائي، بدرجة أسرع ثم أسرع، إلى أن ينتهي النظام إلى الهولوية (يمين)، فيكون التعداد بقيمة مختلفة كل فترة تالية.

عالج جيمس يورك هذا التصرف باستفاضة في بحثه المذكور آنفاً، وأثبت أنه في أى نظام أحادى الأبعاد، لو ظهرت دورة ثلاثية، فإن النظام سوف يظهر دورات منتظمة فترات أخرى تالية، وأيضاً دورات هيولية تماماً. كان لهذا الاكتشاف وقع الصاعقة، لتعارضه مع الحدس البديهي، والذي قد يوحي بأنه من السهل إقامة نظام يحوى دورية ثلاثية دون أن يحتوى على حالة الهولوية أبداً، وقد برهن يورك استحالة ذلك.





شكل ٣ - ٣ نوافذ في الحالة الهيولية: حتى مع أبسط المعادلات، بينت منطقة الهيولية في شكل التفرع الثنائي أنها تتضمن مناطق كامنة من التنظيم، لم تكن تخطر على بال ماى في البداية. بداية، يتسبب التفرع الثنائي في دورات كالتالي: ٢، ٤، ٨، ١٦... بعد ذلك تبدأ حالة الهيولية، حيث لا نظام. بعد ذلك، حين يدفع النظام بدرجة أشد، تفتح نوافذ في المنطقة بدورات فردية، ٦، ١٢، ٢٤... يزداد الهيكل عمقا إلى ما لا نهاية. حين تكبر منطقة ما، تراها تتشابه تماما مع الشكل الأصلي.

ورغم أهمية بحثه، فقد اعتبر يورك أن شهرته تجاوزت قيمته العلمية، وقد كان هذا صحيحاً إلى حد ما. فبعد عدة سنوات، كان يحضر مؤتمراً ببرلين الشرقية، وعنّ له أن يقوم بجولة سياحية في المدينة، خلالها لاحظ شخصاً روسياً يريد أن يقول له شيئاً ما. وبمساعدة صديق بولندي علم يورك أن الروسى يريد أن ينهى إليه أنه قد وصل إلى نفس النتيجة، واعداً أن يرسل له بحثه. وبعد أربعة أشهر وصل البحث بالفعل، ولكن يورك كان قد فعل ما هو أكثر من مجرد بحث رياضي، لقد أرسل رسالة للفيزيائيين عن الهولوية، إنها حالة مراوغة، مستقرة، ذات كيان محدد. أيضاً فقد بين أن النظم المعقدة، والتي كانت تعالج تقليدياً عن طريق المعادلات التفاضلية متصلة الزمن، أصبح من الممكن فهمها عن طريق خرائط بسيطة مرسومة على فترات منتظمة.

وقد اتضح من تجربة الرحلة السياحية مدى الانفصال بين العلماء الغربيين والسوفييتيين، من جهة بسبب اللغة، ومن جهة أخرى بسبب القطيعة السياسية، الأمر الذي أدى إلى أن يكرر العلماء في كل طرف أعمالاً قام بها أقرانهم في الطرف المقابل. لقد اتضح أن دراسات الهولوية ترجع في الاتحاد السوفيتي إلى الخمسينات، والأهم من ذلك، لم تكن الفجوة بين الرياضيين والفيزيائيين موجودة لديهم.

وقد أثارت أعمال سمول العلماء السوفيت كثيراً، وعلى الأخص نموذج الحدوة، والذي سرعان ما ترجمه أحدهم، وهو **ياشا سنای** Yasha Sinai إلى نظم ديناميكية حرارية. وحدث نفس الشيء لأبحاث لورنز حين قُدِّر لها أن تنتشر في السبعينات. وفي الوقت الذي كان يورك وماي يناضلون فيه لكي يجمعوا بين الفيزيائيين والرياضيين، كان سيناي ورفاقه قد شكّلوا مجموعة عمل في جوركي، وبعدها أصبحت من عادة بعض علماء الغرب الباحثين في الهولوية أن يسافروا بانتظام للاتحاد السوفيتي.

في الغرب كان يورك وماي أول من استقبلوا صدمة التضاعف في الدورات، ومن نقلوها لرفاقهم. لقد تجاوز البيولوجيون **التشعب الثنائي** bifurcation خلال أبحاثهم بسبب افتقارهم إلى وسائل رياضية على الدرجة المناسبة من القوة، ومرّ الرياضيون على هذه الظاهرة مرور الكرام. ولكن ماي، والذي يقف بقدم في كل من المعسكرين، علم أنه سوف يخوض مجالا مليئاً بالإثارة والعظمة.



تطلب البحث بدرجة أعمق الاستعانة بإمكانيات الحاسوب، وكان لدى فرانك هوبنستد Frank Hoppensteadt حاسوب يفى بالغرض، قرر أن يستخدمه في عرض سينيمائي.

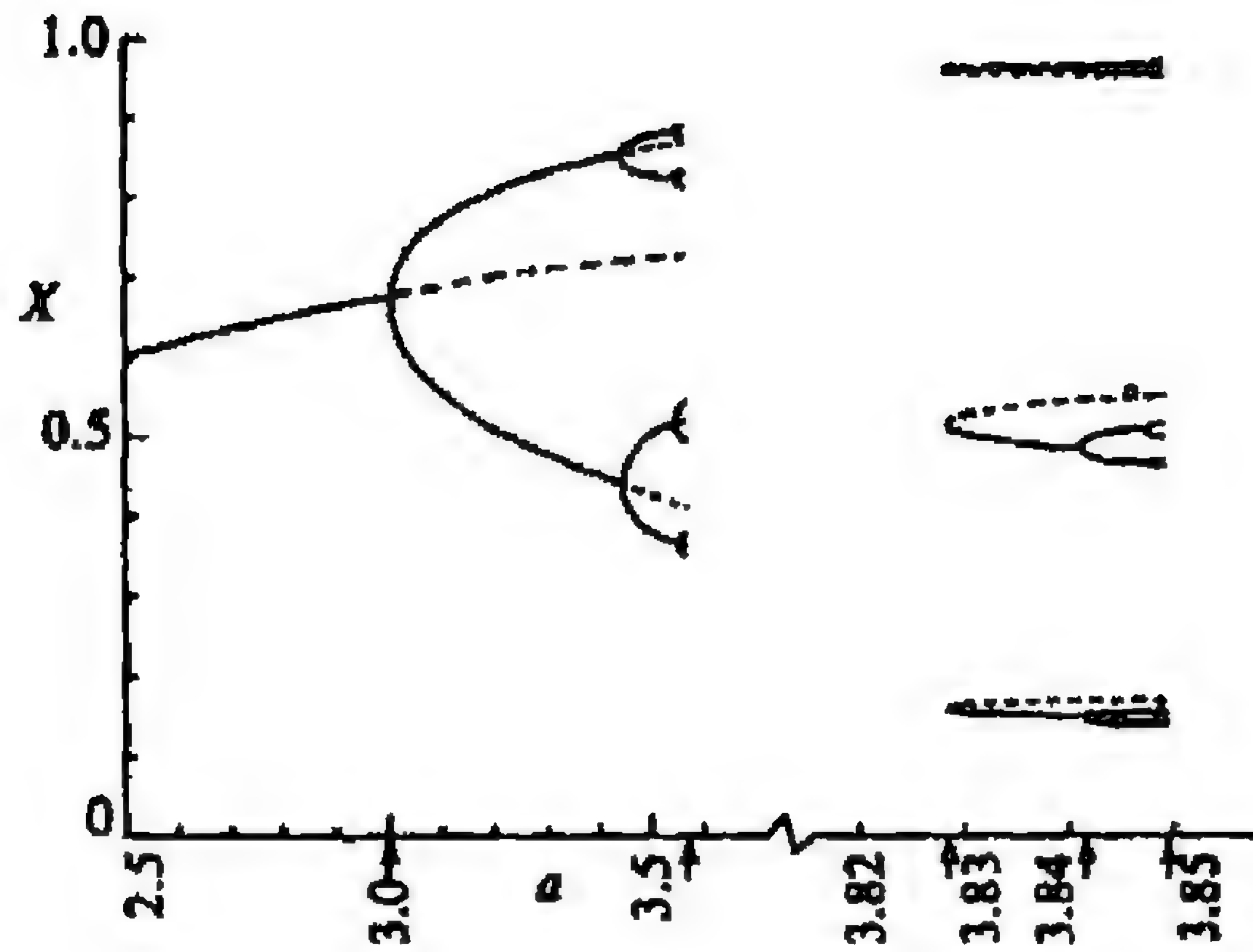
أدخل هوبنستد، عالم الرياضيات الذي وجد لديه شغفا بالبيولوجيا، المعادلة اللوجستية اللاخطية في حاسوبه لتحسب مئات الملايين من المرات، مخرجاً الآلاف من المخرجات عند القيم المختلفة من المعامل اللاخطي. كان التشعب الثنائي يظهر، ثم الهولوية، تتخللها شعيرات من نظام لا يلبث حتى يتلاشى. وشعر هوبنستد أنه بفيلمه وكأنه يطير في عالم غريب تماماً.

ورأى ماي فيلم هوبنستد، كما قام بجمع بيانات مشابهة من مجالات علمية أخرى، علم الأجناس والاقتصاد وميكانيكا الموائع. وكمبشر بالهولوية، كانت له ميزتان على أقرانه من الرياضيين، فهو أولاً كان يعلم أن المعادلات البسيطة ليست واقعية، بل هي أشبه بالكنايات، وكان همه أن يعلم إلى أي مدى تصدق الكنايات في تصوير الواقع. وثانياً، أن اكتشافاته في مجال الهولوية كانت تصب مباشرة في قلب مجاله التخصصي، مثيرة الكثير من الخلافات.

وعلى أية حال، فإن الخلافات أمر شائع في مجال التعداد البيولوجي. فقد كان الخلاف محتدماً مثلاً بين علماء البيولوجيا الجزيئية وعلماء البيئة. كان الأولون يعتقدون أنهم يمارسون العلم في صورته الخالصة، بينما الآخرون يمارسون علماً مبهماً. بينما رأى علماء البيئة أن البيولوجيين الجزيئيين لا يفعلون سوى تكرار البحث في مسائل قُتلت بحثاً.

وفي داخل مجال البيئة ذاته، لاحظ ماي أن الخلاف محتدماً حول طبيعة التغير في تعداد الأفراد. ففريق يرى أنه يسير على نمط منضبط، عدا بعض الاستثناءات، بينما يرى الفريق الآخر العكس تماماً، أن النمط في أصله غير منضبط، مع وجود استثناءات. وليس مفاجأة أن ينسحب هذا الانقسام في الرؤية على أسلوب التعامل الرياضي الصارم على المسائل البيولوجية الهلامية، فالفريق الأول يرى أنه لا بد من وجود آليات تضمن ذلك الانضباط، بينما يرى الفريق الثاني أنه لا بد من وجود عوامل تزيل احتمالات عدم الانضباط.

وفي خضم هذا الشقاق، جاءت الهولوية برسالة تدعو للدهشة، إن النماذج التحديدية البسيطة يمكن أن تولد ما يشبه التصرفات العشوائية، إلا أن هذه التصرفات لها في الواقع هيكل متقن، على أن كل جزء منه يبدو متميزاً تماماً عن التشويش. لقد اقتحم هذا الاكتشاف خضم المعركة الخلافية.



شكل ٤ - ٣ ملامح شكل التفرع الثنائي كما رآه ماي، قبل أن تظهر حاسبات أقوى مدى ثرائه.

واستمر ماي في النظر في النظم البيولوجية من منظور الهيولية، واستمرت النتائج التي تعصف بالتصورات الحدسية في الظهور. ففي قضية الأوبئة، من المعروف أنها تأتي في موجات منتظمة أو غير منتظمة. وقد أدرك ماي أن التغيرات يمكن أن تولد عن طريق نموذج غير خطي، وتساءل عن إمكانية تأثير تدخل خارجي على مثل هذا النموذج، عن طريق برنامج للتطعيم ضد الوباء مثلاً. لقد رأى أنه حتى ولو كانت النتيجة النهائية في صالح القضاء على الوباء، فإنه لا بد أن يعاني من اضطرابات مرحلية خلال الوصول لهذه النتيجة. فلو أن مسئولاً عن حملة التطعيم قد لاحظ ارتفاعاً في مستوى الوباء خلال الحملة، فإنه على التو سوف يعتقد بفشلها.

وخلال عدة سنوات قليلة، أعطت أبحاث الهيولية دفعة للأبحاث البيولوجية، جامعة الفيزيائيين والبيولوجيين على بساط بحث مشترك، لم يكن متصوراً لفترة قصيرة من قبل. وبحث علماء البيئة والوبائيات عن بيانات من الماضي كانت قد استبعدت على أساس عدم صلاحيتها للدراسة، واكتشفت ظواهر الهيولية لفترة تعود لقرنين من الماضي. وبدأ البيولوجيون الجزيئيون يرون البروتين كنظام متحرك، كما أخذ علماء وظائف الأعضاء ينظرون للأعضاء ليس على أساس هياكل صماء، ولكن كنظم مهتزة اهتزازاً معقداً، تارة بصورة منتظمة وتارة غير ذلك.

كان ماي يدرك ما تثيره ظواهر التعقد في النظم من خلاقات علمية، وكيف أن كل مجال يعتبر حالة الهيولية في نظمه حالة خاصة في حد ذاتها. كان الموقف يثير اليأس،

ولكن، ماذا لو أن العشوائية الظاهرية أتت من نظم بسيطة؟ وماذا لو أن نفس النظام يمكن أن ينتج نفس صورة التعقد في مجالات علمية مختلفة؟ لقد أدرك ماى أن الهياكل المدهشة التي هو بالكاد قد بدأ يتكشفها ليست قاصرة بالضرورة على علم البيولوجيا، وتساعل عما إذا كان هناك علماء آخرون قد انتابتهم الدهشة في مجالاتهم العلمية كما انتابته في مجاله. ونشط على التوفى كتابة ورقة اعتبرها تبشيرية، نشرها في مجلة "الطبيعة" *Nature* عام ١٩٧٦.

نادى ماى بأن العلم سوف يرتدى ثوباً جديداً لو أن الطلبة الشُّبان قد زُودوا بآلة حاسبة، وتعلموا كيف يجرون الحسابات مع المعادلة سالفة الذكر، إن مثل هذه الحسابات، والتي أوردها تفصيلياً في ورقته، سوف تواجه الإحساس بالفوضوية الذي يتولّد نتيجة التعليم التقليدي. إنها سوف تغير من نظرة الناس لكل شيء، من نظرية الدورات الاقتصادية إلى أسلوب انتشار الشائعات.

يجب أن تدرس الهيولية للطلاب، ولقد آن الأوان لإدراك أن التعليم التقليدي، مهما بلغت أدواته من قوة، قد أعطى إحساساً خاطئاً عن الظواهر الطبيعية.

أ في نموذج عالي التجريد كهذا، اعتبر التعداد بين الصفر والواحد الصحيح، الصفر يمثل حالة الانقراض التام، والواحد الصحيح يمثل أقصى عدد متصور من التعداد.

أ٢ مشتقة من الكلمة اللاتينية *logos* بمعنى مسكن أو مقر، وقد وضع هذه المعادلة العالم Verhulst عام ١٨٤٥ كما تسمى أيضاً "معادلة الفروق الترييحية" لكون الرمز "س" يدخل في المعادلة مرفوعاً للقوة الثانية، انظر التحليل الرقعى لهذه المعادلة في الفصل السادس، شكل ٦-٨، المترجم.

هندسة الطبيعة

تولدت في ذهن بنوا ماندلبروت Benoit Mandelbrot صورة للطبيعة تشكّلت على مرّ السنوات، كانت عام ١٩٦٠ غامضة، مجرد صورة شبحية، ولكنه تعرف عليها حين رآها مجسدة أمام عينيه، على سبورة بمكتب هندريك هوثاكر Hendrik Houthaker.

كان ماندلبروت رياضيا متعدد المواهب، نشأ موهوبا بذهن علمي متوقّد، وترعرع في مركز أبحاث شركة "الشركة العالمية للمهمات المكتبية International Business Machines Corporation" والمشهورة بالاسم I.B.M.. كان قد اتخذ من الاقتصاد مجالا له، يبحث في توزيع الدخل الكبيرة والصغيرة في بيئة اقتصادية ما. أما هوثاكر فقد كان عالم اقتصاد بجامعة هارفارد، وكان قد استدعى الرياضى الشاب لإلقاء كلمة. وذهل الأخير حينما رأى بعضا من اكتشافاته على سبورة أمام عينيه، فتساءل مازحا: "كيف يمكن لرسوماتي البيانية أن تسبقني إلى المحاضرة؟".

لم يفهم هوثاكر السؤال، فما كان على السبورة لم تكن له أية علاقة بتوزيع الدخل، بل مجرد أسعار القطن على مدى ثمانية سنوات خلت.

وبالنسبة إلى هوثاكر أيضا، كان بتلك الرسومات شيء مُحير. فالاقتصاديون ينظرون لأسعار السلع عموما على أنها تتراوح بين وضعين، عادي وشاذ. وعلى المدى الطويل، تدفع الأسعار للتغير عن طريق القوى الاقتصادية، أما على المدى القصير، فإنها قد تتراقص بصورة قد تكون عشوائية إلى حد ما. ولسوء الحظ، فإن بيانات أسعار القطن قد فشلت في تحقيق هذا التوقع. كانت القفزات الكبيرة أكثر من اللازم. وقد وجدت تغيرات بسيطة بطبيعة الحال، ولكن نسبتها إلى التغيرات الكبيرة لم تكن كبيرة بالقدر المتوقع. فمنحنى التوزيع لم يكن يسير كما يتوقع له.

إن النموذج القياسى لرسم التغيرات العشوائية كان ولا يزال هو منحنى الجرس، حيث تتركز أغلب البيانات حول منتصف الشكل، بمعنى أن أعلى قمته هي ما يقابل القيمة المتوسطة. وعلى جانبى هذه القيمة، يهبط المنحنى بسرعة إلى الصفر، ويستخدم رجال الإحصاء هذا المنحنى كما يستخدم الطبيب السماعه، أداة مبدئية للبحث. إنه

يمثل ما يسمى "توزيع جاوس" لتمثيل التصرفات التي لا تخضع لنظام ما في الطبيعة. فالفكرة هي أن التغيرات العشوائية تكون مركزة حول قيمة متوسطة، وأن القيم التي تشذ عنها ترتب نفسها ببراءة في شكل متمائل حول القيمة المتوسطة. ولكن تطبيق هذا المنحى على بياناته كان يوحي على الدوام بوجود شيء مفقود.

لم يكن في استطاعة هوثاكر أن يرتب أسعار القطن على هذه الصورة القياسية، كان الشكل الناجم هو نفسه الذي يثير في نفس ماندلبروت الخيالات في أماكن متعددة. على عكس أقرانه من الرياضيين، كان ماندلبروت يعالج قضاياها على أساس حدسه حول الأشكال والأنماط. كان لا يثق في التحليل قدر ثقته في الأشكال. وكان قد وصل بالفعل إلى أن هناك قوانين أخرى تحكم الظواهر العشوائية، تنتج أنماطا أخرى من التصرفات.

وعاد ماندلبروت إلى مكتبه محملاً بصندوق معبأ ببيانات أسعار القطن التي رآها، ثم سارع على الفور بالاتصال بوزارة الزراعة في واشنطن، طالبا الأسعار إلى عام ١٩٠٠.

وكغيرهم من العلماء في المجالات الأخرى، كان علماء الاقتصاد يدركون أنهم على حافة الثورة الحاسوبية، حيث يتمكنون من معالجة البيانات بقدرة لم تكن متخيلة من قبل. على أن البيانات كانت لا تزال محتاجة للتطويع لإمكان استخدامها، فقد كان عصر الكروت المثقبة في بدايته. كان الطريق لا يزال شاقا. والاقتصاديون، على شاكلة البيولوجيين، يتعاملون مع كائنات ذات إرادة، بل يتعاملون مع أكثر الكائنات غموضا.

ولكن مجال الاقتصاد يقدم على الأقل كمأ وافر من البيانات. وقد مثلت أسعار القطن من وجهة نظر ماندلبروت معينا مثاليا للبيانات. كانت وافية، وكانت تعود في القدم إلى بداية القرن. إن القطن من السلع ذات الأهمية الخاصة، ومن ثم كانت العناية بحفظ بياناته في بورصته الأمريكية الرئيسية في نيويورك، والتي كانت مرتبطة ببورصته في ليفربول.

ورغم محدودية وسائل التحليل لدى الاقتصاديين حول تغير الأسعار، إلا أن ذلك لم يكن يعنى افتقارهم لتصور مبدئي عن ذلك. على العكس، كانت لديهم مفاهيم عن الموضوع يؤمنون بها تماما. من ذلك أن التغيرات الطارئة لا علاقة لها بالتغيرات طويلة الأمد، فالأولى تأتي عشوائية، في حدود يوم أو اثنين، غير متوقعة، ومن ثم فهي أشبه بالشوشرة التي لا تثير اهتماما خاصا. أما التغيرات على المدى البعيد فهي مخالفة تماما. فتغير الأسعار على مدى أشهر أو سنوات أو عقود تكون بسبب قوى جسيمة،

كاتجاه لحرب أو حالة كساد، أسباب من الوجهة النظرية قابلة للفهم. لدينا إذن في جانب أزيز من تغيرات عشوائية، وفي الجانب المقابل إشارات لتغيرات على مدى بعيد. ولم يكن ذلك يوافق النظرة التي تكونت لدى ماندلبروت عن الطبيعة وتصرفاتها. فبدلاً من عزل التغيرات الطارئة عن غيرها من طويلة الأمد، كانت صورته الذهنية تجمعهما معاً. كان لا ينظر للأنماط بناءً على مقياس معين، بل على مستوى كافة المقاييس. كان من الصعب تصور كيف يمكن أن ينتج صورته، ولكنه كان مقتنعاً بوجود تماثل، ليس بين اليمين واليسار، وليس بين الأعلى والأدنى، ولكن بين الصغير والكبير من المقاييس.

والذي حدث أنه حين أجرى ماندلبروت البيانات على حاسوب أي بي إم، حصل بالفعل على النتائج التي كان يبحث عنها. إن القيم التي تمثل الشذوذ من وجهة نظر التوزيع القياسي، تنتج تماثلاً من وجهة نظر المقاييس. كل تغير في السعر كان عشوائياً وغير متوقع، ولكن التغير كان يسير في خط ثابت على كافة المقاييس؛ فالتغيرات اليومية تتماثل تماماً مع التغيرات الشهرية. الشيء الذي لا يكاد يصدق أن درجة التغير طبقاً لتحليل ماندلبرو قد ظلت ثابتة على مدى ستين عاماً، واجهت خلالها حربين عالميتين تخللتهما حالة كساد عالمي.

وسط هذا الركام من البيانات المتفرقة كان يكمن نوع من النظام. وأمام هذا الموقف تساءل ماندلبروت عن مغزاه وعن سببه، وكيف جمع بين أسعار القطن وتوزيع الدخول. والحقيقة أن معلومات ماندلبروت في الاقتصاد كانت غير كافية للتفاهم مع الاقتصاديين. وحين قام بنشر بحثه، قدم له أحد طلابه بمقدمة تربط بين البحث واللغة الاقتصادية. ثم اتجه ماندلبروت إلى اهتمامات أخرى، ولكنه كان عاقد العزم على متابعة الكشف عن ظاهرة المقياسية scaling، كانت تبدو ظاهرة ذات قيمة في حد ذاتها - إنها بصمة.



في مقدمة له لمحاضرة بعد عدة سنوات، قدم على أنه: (".... قام بتدريس الاقتصاد في جامعة هارفارد، والهندسة في جامعة ييل، والفسولوجيا في كلية الطب بمدرسة آينشتاين..."). وكان يعقب بفخر على مثل هذه التقدّمات: "أحياناً ينتابني شعور حين أسمع تاريخي العلمي بأنني لم أوجد قط، إن نقاط الالتقاء بين هذه المجالات منعدمة تماماً". حقاً لقد فشل ماندلبروت منذ أيامه الأولى في أي بي إم أن يظل على قائمة

مجال علمى لمدة طويلة. كان دائما زائرا من الخارج، يأخذ أساليب غير تقليدية إلى زاوية غير مطروقة من الرياضيات، مستكشفا مجالا علميا نادرا ما كان يرحب فيه به، مخبئا آراءه العظمى حتى يتمكن من نشر أبحاثه، متعيشا فقط على ثقة رؤسائه بشركة آى بى إم. لقد قام بغزوة فى مجال الاقتصاد، ثم تركه مخلفا وراءه آراء مثيرة، ولكنها لا تصلح بحال أن تكون عملا متكاملا.

فى قصة الهيولية، شق ماندلبروت لنفسه طريقا خاصا. إن صورة الطبيعة فى ذهنه قد تطورت منذ أن لاحت غامضة له فى الستينات حتى صارت شكلا من الهندسة على أعلى قدر من الرسوخ. بالنسبة للباحثين فى الهيولية السائرين على درب لورنز وسميل ويورك وماي، كان عالم الرياضيات هذا يلعب مشهدا جانبيا، ولكن أسلوبه ولغته أضحت بعد حين جزءا لا يتجزأ من العلم الجديد.

سيبدو وصف ماندلبروت غريبا على من لم يعرفه إلا فى سنوات مجده، وما حصله من ألقاب وجوائز، ولكنه فى الواقع لا يمكن فهمه على حقيقته إلا من خلال نشأته الأولى، أو بالأحرى بصفته كلاجئ. لقد ولد عام ١٩٢٤ فى وارسو لعائلة يهودية من لتوانيا، نزحت بسبب القلاقل السياسية إلى باريس عام ١٩٣٦، حيث كان يقيم عم له، وهو الرياضى زولم ماندلبروت Szolem Mandebrot. وبقيام الحرب كان على العائلة أن تواجه خطر النازى مرة أخرى، فلحقت بالفلول الهاربة إلى أن وصلت مدينة تول Tulle.

وظل بنوا ربحا من الزمن كمتدرب حرفي، شادا عن المؤلف فى أمرين؛ طوله غير العادي، وخلفيته التعليمية الفقيرة. كانت فترة مليئة بالمصاعب والمخاوف، ولكنه لم يكن يحمل من ذكرياتها شيئا من ذلك، بل كان يحمل ما حققه فيها من صداقات، وما أحيط به من رعاية، خاصة من مدرسيه، ومنهم شخصيات ذات وزن، اكتووا هم أنفسهم بنير الحرب. على وجه العموم، كان تعليمه متقطعا وغير نمطي. لم يكن يدعى أبدا أنه يعرف الحروف الأبجدية، أو جدول الضرب فيما يجاوز الصفوف الخمسة الأول، ولكن كانت لديه موهبة.

بعد تحرير باريس، تمكن بنوا من اجتياز امتحان التقدم لمدرسة الإيكول نورمال ثم الإيكول بوليتكنيك، رغم ضعف استعداده التقليدى. لقد تضمنت امتحانات القبول اختبارا فى الرسم، وهو ما اكتشف ماندلبروت فى نفسه قدرة كامنة فيه. أما فى مادة الرياضيات، فقد مكنته قدرته على تمثيل الأشكال من حل المسائل المعروضة، معادلاً بها ضعف تدريبه على الحلول النمطية. لقد اكتشف فى نفسه قدرة على النظر لأى مسألة تحتاج إلى تحليل على أنها نمط من الأشكال يتصوره فى ذهنه. وإذا ما أعطى شكلا

ما، فإنه يكون قادراً دائماً على معالجته بالتحويل وتغيير التماثل لجعله أكثر تناسقا. وفي الغالب كانت معالجته تقود على الفور إلى حل للمسألة التحليلية المقابلة. وعلى ذلك فقد حصل في الكيمياء والفيزياء، حيث لا مجال لاستغلال قدرته على تطبيق الأشكال الهندسية، على درجات منخفضة.

وتُعتبر المدرستان اللتان التحق بهما من المدارس الراقية التي لا نظير لهما في الولايات المتحدة. وكانت الإيكول نورمال هي الأكثر رقياً، بدأ بالالتحاق بها، ولكنه تركها بعد عدة أيام ليلتحق بالأخرى، لقد كتب عليه أن يكون لاجئاً للمرة الثانية، هذه المرة من سيطرة عالم رياضيات ذى أسلوب خاص في دراسة الرياضيات، يدعى بورباكي Bourbaki.

ربما لم يكن بورباكي ليحقق ما حققه من نجاح في بلد خلاف فرنسا، حيث الخضوع التام للتقاليد العلمية واحترام الثقة من العلماء الأكاديميين. فهو قد وضع مدرسة في مجال الرياضيات تتميز بالصرامة المطلقة في جعل هذا العلم علماً خالصاً منغلقة على ذاته، وفي التمسك بمناهج البحث التقليدية، ولا يعترف بالأمور التطبيقية بأية حال، كما كان يحارب التصور البياني للمسائل الرياضية، معتبراً أن قدرة الرياضي تتمثل في التحليل الذهني. واشتهرت هذه المدرسة التي أُرجع أساسها إلى العالم الفرنسي الشهير بوانكاريه، وطغى هذا الفكر على مناهج التفكير الرياضي لمدة طويلة. على أنه في القرن العشرين بدأ طلاب الرياضيات يواجهون أنفسهم بالخيار بين المعيشة في هذا البرج العاجي، أو النزول إلى العالم الواقعي وجعل الرياضيات أداة لخدمته.

وكان تأثير منهج بورباكي طاغياً في فرنسا، وأكثر طغياناً على الإيكول نورمال، الأمر الذي استدعى ماندلبروت إلى ترك المدرسة فراراً بما ميزه الله به من مواهب. على أن الضربة القاصمة لمدرسة بورباكي جاءت حين تحطمت صرامة منهجه التجريدية بظهور الحاسوب، والذي خلفها أثراً من آثار الماضي، ولكن الوقت كان متأخراً بالنسبة لماندلبروت، حيث اضطر للمرة الثانية، وبعد عشر سنوات إلى الفرار من فرنسا بأسرها لنفس السبب، هذه المرة إلى الولايات المتحدة.



كتب ماندلبروت ذات يوم: "سوف تكون كارثة على العلم، (وأيضاً على الألعاب الرياضية) إذا كان للتنافس المقام الأول فوق كل شيء، وإذا تمثل هذا التنافس في الانسحاب إلى مجالات ضيقة من التخصص. إن أولئك العلماء الجوالين بطبيعتهم بين

فروع العلم يلعبون دورا هاما في إثراء الحياة العلمية". وينطبق عليه هذا الوصف أصدق انطباق، خاصة حين أصبح يتمتع بالحماية التي أسبغتها عليه أي بي إم عندما ضمته إلى مركز أبحاثها. وعلى مدى ثلاثين عاما من النكران إلى الشهرة، لم ير عملاً له يرحب به في المجال الذي قصد أن يوجهه له. حتى الرياضيون، ودون قصد خبيث، كانوا يرددون أنه مهما كانت طبيعة ما يفعله ماندلبروت، فهو ليس واحدا منهم.

لقد وجد طريقه ببطء، في الغالب محرّضا بمعرفته الواسعة بخبايا التاريخ العلمي المجهولة. لقد دخل في مجال رياضيات اللغة، مبينا قواعد توزيع الكلمات بها (يقول إن الفكرة واثته وهو يقرأ كتابا التقطه عرضا من سلة مهملات بإحدى محطات المترو لكي يقطع به الوقت). وأجرى أبحاثا في نظرية الألعاب، وشق طريقه في الاقتصاد، وكتب في قواعد تخطيط المدن كبيرها وصغيرها. وقد ظل الخط العام الذي يوجه تفكيره في كل هذه الموضوعات غامضا.

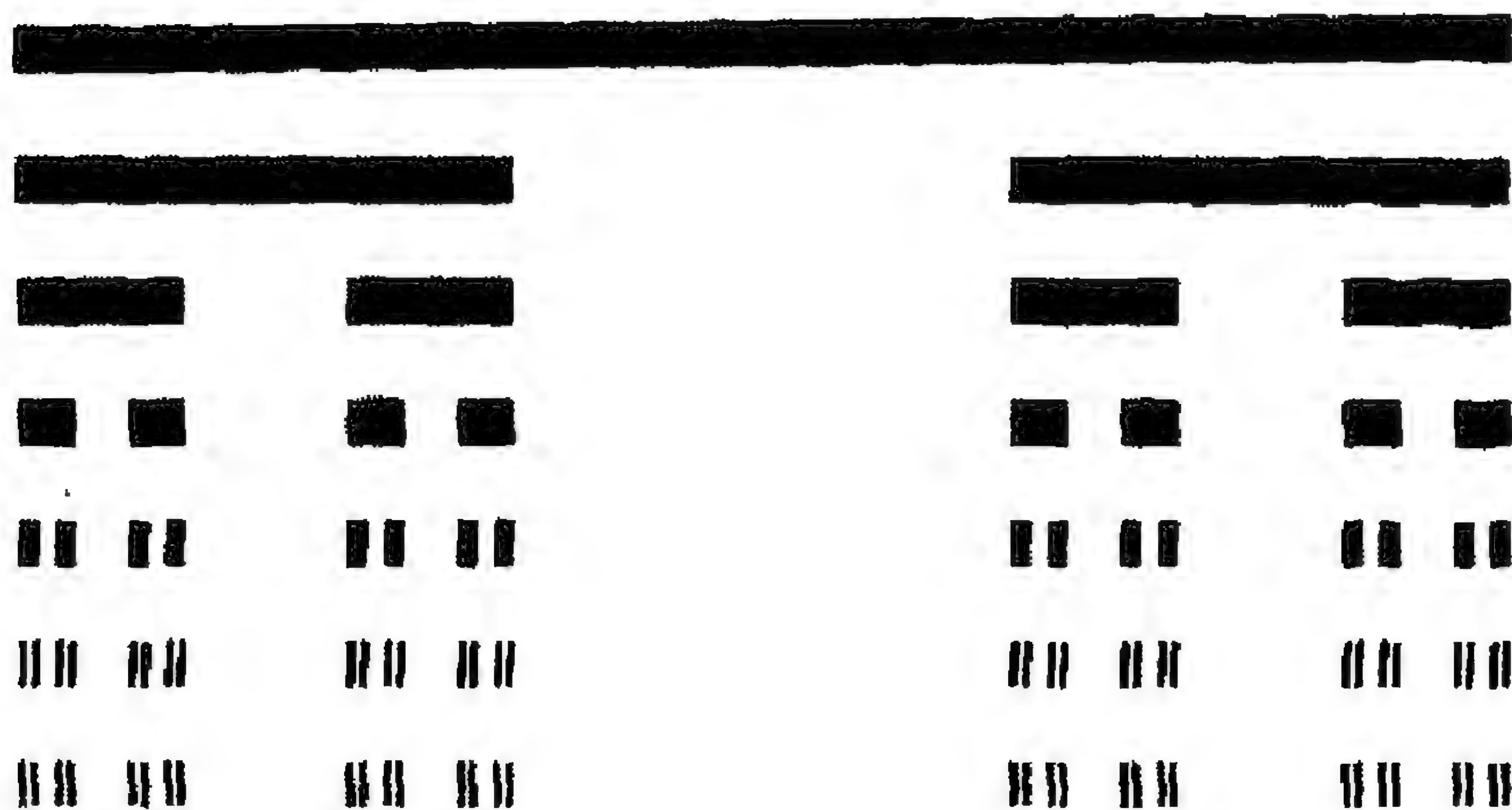
في بداية عمله بشركة أي بي إم، وبعد قليل من أبحاثه في توزيع الدخول، عرض عليه رئيسه مشكلة تهم العمل بالشركة، متعلقة بالتشويش الذي يتداخل في خطوط الاتصالات التي تربط بين الحاسبات. إن البيانات تُنقل عبر هذه الخطوط على صورة نبضات كهربية، ويعلم المهندسون أنه كلما زادت النبضة قوة، أمكن التغلب على ذلك التشويش. ولكن نوعا من التشويش اللحظي كان عصيا على التخلص منه، إذ كان يبرز بصورة فجائية ليُدمر الإشارات المنقولة.

على الرغم من أن طبيعة هذا التشويش كانت عشوائية، فقد كان الملاحظ أنه يأتي في تجمعات، حيث توجد فترات خالية منه، تتلوها فترات مشوبة به. وحين تحدث ماندلبروت مع المهندسين، علم حقيقة عن تلك التشويشات. لم تكن تذكر بصفة رسمية، حيث لا توجد لغة رسمية للتعبير عنها، وهي أنه كلما نُظر إليها بدقة أكثر، زاد مظهرها تعقدا. وقدم ماندلبروت طريقة لتصوير توزيعها، تتوقع بالضبط النمط الذي تبدو عليه، والذي كان متميزا بخاصية غريبة، أن التوزيع لا يتم حول قيمة متوسطة، فمن المستحيل حساب قيمة متوسطة للشوشرات كل يوم، أو كل ساعة، أو كل ثانية.

وقام أسلوبه في الوصف على أساس التغلغل أكثر وأكثر في الفصل بين فترات التشويش وفترات الخلو منه. لنفرض أننا قسمنا الإرسال إلى ساعات، ساعة خالية من التشويش، وساعة مشوبة به. ثم افرض أننا قسمنا الساعة المشوبة إلى فترات أقل، كل فترة عشرون دقيقة. ستجد في الحالتين أن كل فترة إرسال تتمثل في فترات نظيفة تماما، وفترات مشوبة، تأتي فيها التشويشات على صورة انفجارية، وكل انفجار

تشويشي، مهما كانت ضالة فترته، تتخلله فترات من الاتصال النظيف تماما. الأكثر من ذلك، لقد وجد علاقة هندسية ثابتة بين الصفة التفجيرية للتشويش، والمسافات بين الفترات النظيفة، فالنسبة بين الفترات النظيفة والفترات المشوبة ثابتة على مستوى الساعة، أو على مستوى الثانية.

لم يكن لدى المهندسين إطار علمي يفهمون به وصف ماندلبروت، على عكس الرياضيين. لقد كان يصف في الواقع هيكلا تجريديا يسمى "فئة كانتور Cantor set"، وهي فئة وضعها العالم الرياضى جورج كانتور George Cantor فى القرن التاسع عشر. ولكى تأخذ صورة عن هذه الفئة، خذ خطا مستقيما، ثم أزل من منتصفه بمقدار ثلثه، فتحصل على خطين مستقيمين متساويين. أزل من كل خط ثلثه من المنتصف، تحصل على أربعة مستقيمات، وهكذا إلى آخر مدى يمكنك من الاستمرار. ما الذى تحصل عليه فى النهاية، كم من "العبار" موزع بطريقة معينة، هى التى تصورها ماندلبروت فى توزيع التشويش على خطوط الاتصالات.



شكل ١-٤ عبار كانتور: ابدأ بخط مستقيم، أزل من منتصفه ما يساوى ثلث طوله. أزل من كل قطعة مستقيمة متبقية ثلث طولها من المنتصف، وافعل ذلك مع كافة الأجزاء المتبقية، وهكذا. فئة كانتور هى العبار المتبقى من تكرار العملية، عددها لانهاى، ولكن الطول الكلى صفر.

مثل هذه الخصائص المتناقضة أزعجت رياضى القرن التاسع عشر، ولكن ماندلبروت وجد فى فئة كانتور نموذجا لحدوث الأخطاء فى قنوات الاتصالات. يواجه

المهندسون فترات خالية من الشوشرة، ثم فترات من ظهور مفاجئ لها. كما أن التحليل الدقيق يبين أن فترات الشوشرة في حد ذاتها تحتوى على فترات خالية منها. وهكذا، فقد كانت مثالا لزمن فراكتلي، فعلى أية مقياس، سواء أكانت الفترة ساعة أو دقيقة أو ثانية، وجد ماندلبروت أن نسبة الفترات الخالية من الشوشرة إلى المشوبة بها ثابتة. وقد رأى أن هذا الغبار لا غنى عنه في نمذجة التقطع **intermittency**.

لقد غير ماندلبروت في فهم المهندسين لسبب هذا النوع من التشويش، فقد كانوا يتصورونه نتيجة تداخل خارجي، ولكن نمط ماندلبروت المقياسي بين لهم أنه لا يمكن تفسيره على أساس حوادث محلية. وكان لهذا الفهم أثر على أسلوب التخلص من هذا النوع من التشويش، فبدلا من محاولة الارتفاع بمستوى الإشارات لجعل التشويش أقل، عليهم أن يتقبلوه كواقع لا يقبل الإزالة، وأن ينتهجوا آليات أخرى للحد من أثره.

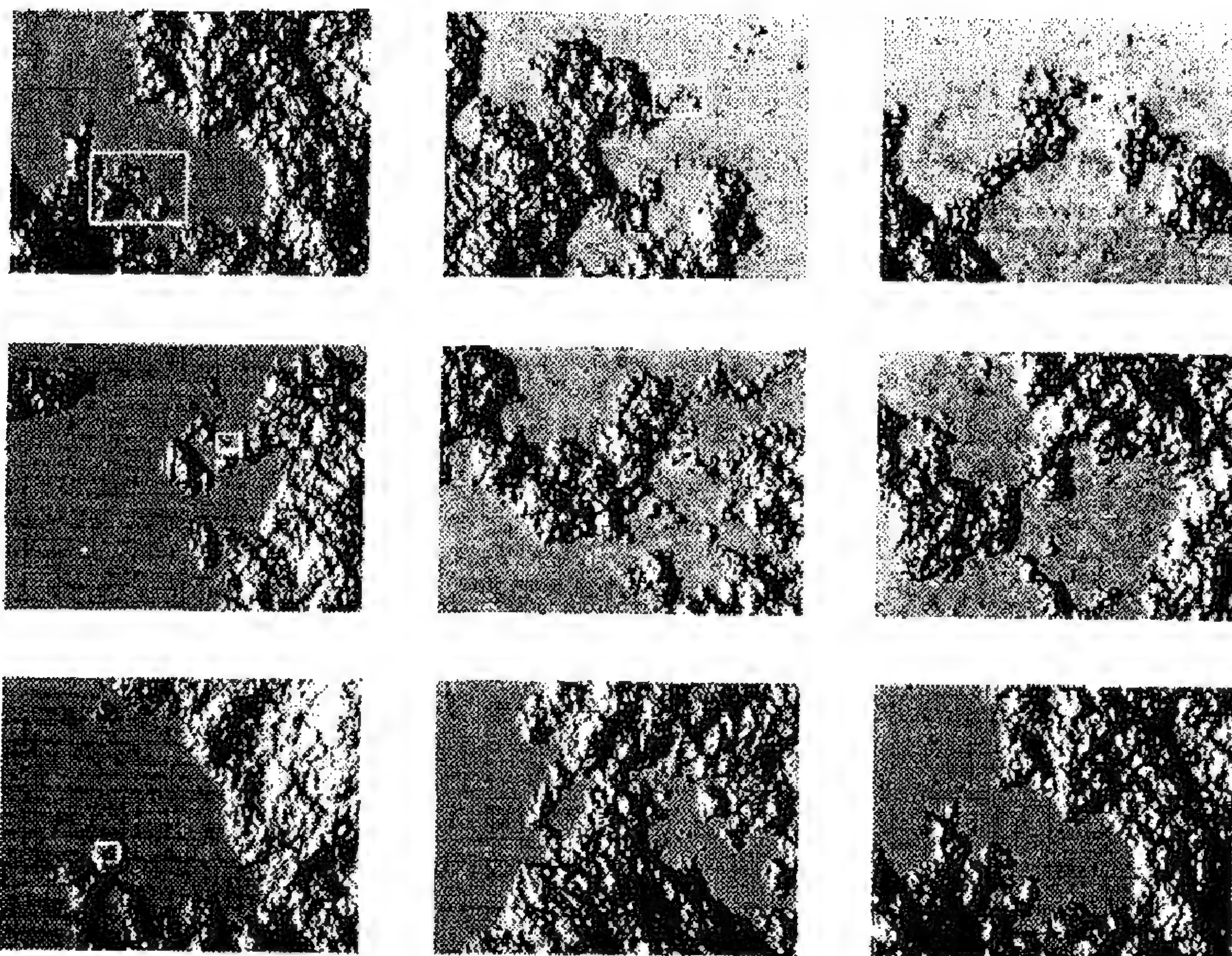
التقطع^(١)، التشويش الفجائي، غبار كانتور، كلها ظواهر ليس للهندسة التقليدية بأشكالها الهندسية من خطوط ودوائر ومخروطات، والتي دامت لعشرين قرنا، أن تستوعبها. إنها تمثل تجريدا غاية في التبسيط للطبيعة، وتوجد فلسفة أفلاطونية (مثالية) حول تماثل أشكالها. ولكن في مجال فهم الظواهر المعقدة من الطبيعة، يعتبر هذا التجريد غير مجدٍ بالمرّة.

ويحلو لماندلبروت أن يقول إن السحب ليست أشكالا كروية، والصواعق لا تسير في خطوط مستقيمة. إن الهندسة الجديدة تحاكي الطبيعة في خشونتها وعدم استوائها أو دقة حوافها. إنها هندسة الأشياء المتراكمة، والمكومة، والمجعدة، والملتوية، والملتفة. لقد انتظر فهم تعقد الطبيعة ظهور من يشك في أن هذا التعقد ليس مجرد عشوائية عارضة، ويؤمن بأن المثير في الصاعقة ليس اتجاهها، ولكن المسار المتعرج لها. لقد قدم ماندلبروت ادعاءً عن العالم، مضمونه أن أشكاله الغريبة ذات مغزى، وليست مجرد تشويشات للأشكال المنتظمة للهندسة الإقليدية. إنها في الغالب مفاتيح لمضامين الأشياء.

ما هو مضمون شاطئ بحري مثلا؟ قدم ماندلبروت هذا السؤال في ورقة كانت بمثابة نقطة تحول في تفكيره. كان عنوانها "ما هو طول شاطئ إنجلترا؟"

التقى ماندلبروت بهذا السؤال في بحث لعالم إنجليزي يدعى لويس ريتشاردسون Lewis Richardsosn، قد خاض في عدة موضوعات أصبحت فيما بعد جزءا من علم الهيدروليكية. فهو قد كتب عام ١٩٢٠ في التنبؤ الجوي، وفي دوامات المياه، وفي سرعات الرياح. أما بالنسبة لموضوع الشواطئ، فقد وجد اختلافات في التقدير قد تصل إلى عشرين بالمائة.

وقد صدم السؤال الذي وجهه ماندلبروت الموجه إليهم إما لكونه غاية في البساطة أو غاية في السخف. كان الرد إما: "لست أدري، ليس هذا مجال تخصصي"، أو "لست أدري، وسأرجع للموسوعات". ولكنه في الواقع كان يقصد أن الإجابة، من منظور معين، هي مالا نهايةⁱⁱⁱ. بمعنى آخر، تعتمد الإجابة على أداة القياس، فكلما صغرت كان الرقم أكبر، ولكنها سوف تظل تقريبية. تصور أن المساح قد استخدم فرجار التقسيم، وفتحه على مسافة ياردة واحدة، واستخدمه في القياس، فإن الإجابة ستكون لأقرب ياردة. ثم قام بتصغير الفتحة لقدم واحد، ستكون الإجابة لأقرب قدم، وسوف تكون التفاصيل بالبدئية أكثر. ثم قام بتصغير الفتحة، وليكن لأربعة بوصات، هنا ستكون التفاصيل أكثر، والرقم أقرب. إن هذه التجربة الخيالية يقصد بها تغيير الأشكال بحسب المقاييس التي ينظر إليها بها. فالناظر للساحل من قمر صناعي سوف يعطي تخميناً أقل من السائر على قدميه يعبر كل صخرة وكل خليج، والسائر بدوره سوف يعطي تخميناً أقل من دودة تسير على الشاطئ، تعبر كل حصاة عليه.



شكل ٤-٢ شاطئ فراكتلي: شاطئ منتج حاسوبيا؛ التفاصيل عشوائية، ولكن البعد الكسري ثابت، مما يؤدي إلى أن تكون درجة الخشونة أو عدم الانتظام كما هي مهما بلغت درجة التكبير.

وتقودنا البديهة إلى القول بأنه مهما بلغت درجات التقريب دقة، فإنها لا بد منتهية إلى رقم ثابت، هو الطول الحقيقي للشاطئ. فالأرقام، بمعنى آخر، يجب أن تتقارب. والواقع لو أن الشاطئ كان أحد أشكال إقليدس المثالية، كدائرة مثلا، فإن الإغراق في الدقة سيؤدي بالفعل إلى تقارب الأرقام إلى القيمة المضبوطة. ولكن ماندلبروت في حالة الشاطئ قد وجد أن الأرقام تستمر في الكبر، ربما لا تنتهي إلا عند دقة تصل إلى حجم الذرة.



حيث إن قياسات إقليدس؛ الطول والعمق والسّمك والقطر، قد فشلت في قياس الأشكال غير المنتظمة، فقد لجأ ماندلبروت إلى أسلوب آخر، أسلوب الأبعاد dimensions. والأبعاد فكرة أكثر ثراء للعلميين منها لغيرهم. فنحن نعيش في كون ثلاثي الأبعاد، بمعنى أنه لتحديد نقطة في الفراغ نحتاج إلى ثلاثة أرقام، الموقع على خط الطول وعلى خط العرض، ثم الارتفاع عن سطح الأرض. وينظر لهذه الأبعاد على أنها متعامدة على بعضها البعض. ونحن في ذلك ما زلنا في نطاق الهندسة الإقليدية، فالفراغ له ثلاثة أبعاد، والأسطح لها بعدان، والخط المستقيم له بعد واحد، والنقطة لا أبعاد لها. ويستفاد من ذلك في رسم الخرائط مثلا، فالبيان المطلوب من خريطة يتحدد برقمين، حتى لو كانت على سطح مطوى، كخرائط الكرة الأرضية مثلا.

والآن، ما هي أبعاد كرة من خيط التريكو؟ يقول ماندلبروت، إن هذا يعتمد على البعد الذي ننظر إليها منه. فمن بعد كبير، تبدو كنقطة لا أبعاد لها، وعلى بعد أقرب، تبدو ككرة ذات ثلاثة أبعاد، أما على القرب الشديد، فيكفي بعد واحد، فهي أصلا مكونة من خيط ذي بعد واحد، وإن كان قد طوى عدة مرات..

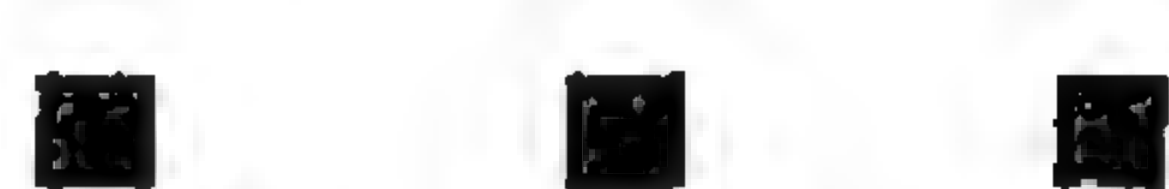
فإذا سائرنا هذا المنطق، ونظرنا على المستوى الميكروسكوبي، فالخيط اسطوانة ذات ثلاثة أبعاد، يتكون من فتائل يمكن اعتبارها ذات بعد واحد، إلا عند مستوى أكبر من التكبير.

وعلى ذلك فإن أبعاد الشيء تكون شيئا آخر غير الأبعاد الثلاثية المألوفة، لكن نقطة الضعف في جدل ماندلبروت تكمن في عدم الدقة في التحديد، واعتماده على عبارات مثل "بعد كبير"، "أكثر قربا"، فماذا عن الوضع بين الوضعين؟ بالتأكيد لا توجد حدود قاطعة بين مراحل التغير في عدد الأبعاد على الصورة التي تم شرحها. على أن هذا الأمر، والذي هو أبعد من أن يكون نقطة ضعف، بقدر ما هو غموض الطبيعة ذاتها، قد قاد ماندلبروت إلى فكرة جديدة حول موضوع الأبعاد.

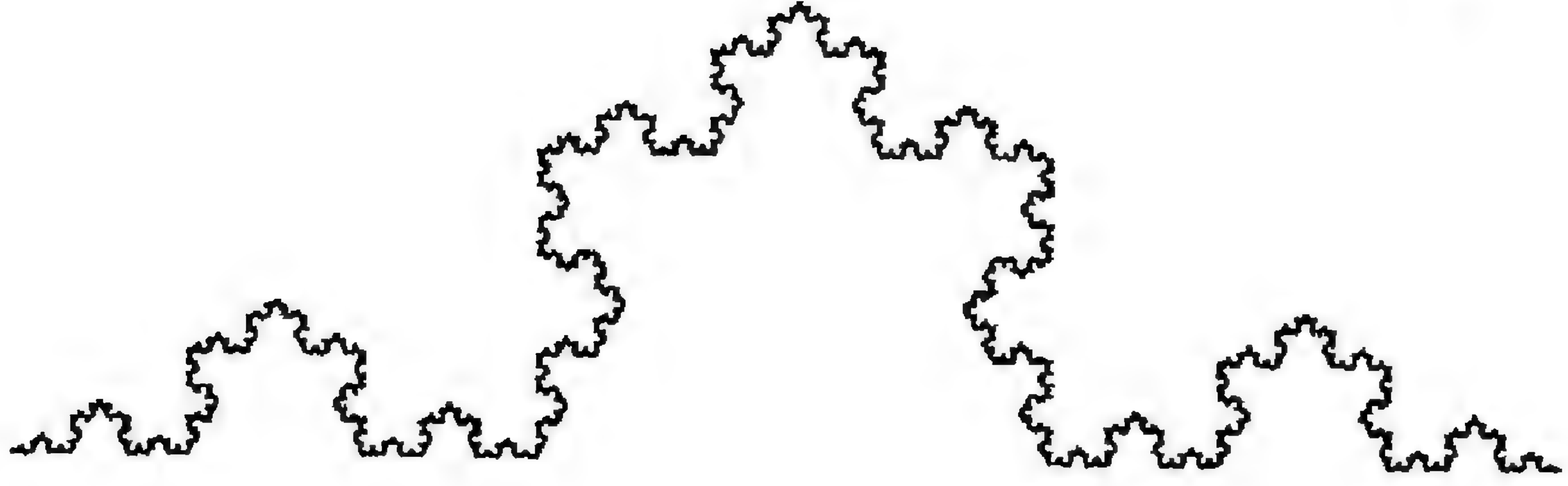
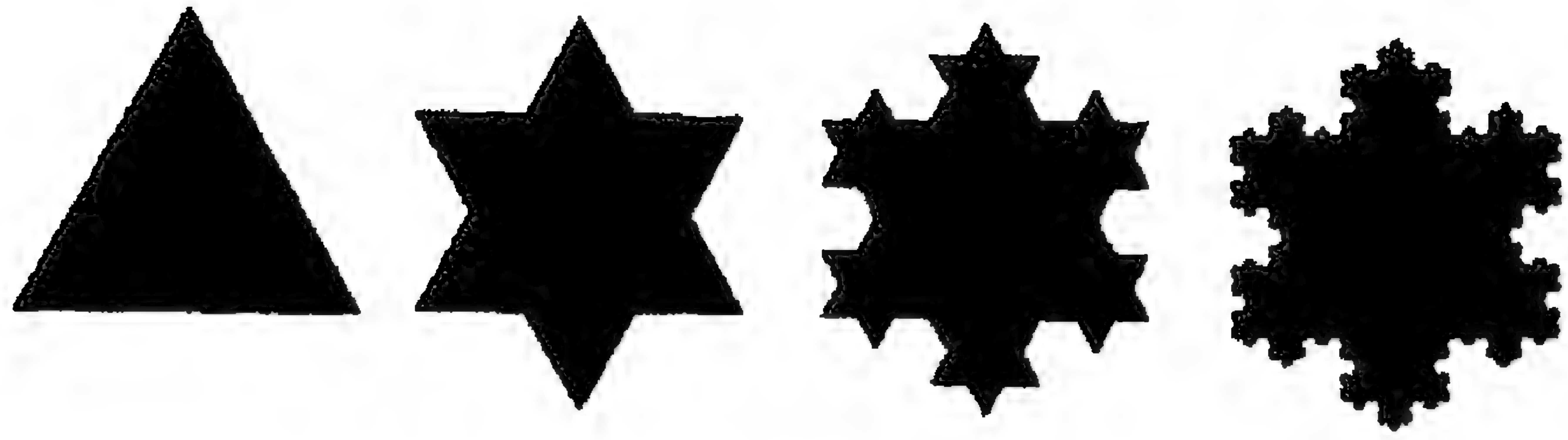
خرج ماندلبروت عن الأرقام الصحيحة في تحديد الأبعاد، ليفترض أرقاماً كسرية، وهي فكرة تشير استحالتها الذعر في قلوب غير الرياضيين، ولكنها أثبتت أنها ذات فائدة قصوى.

إن الأبعاد الكسرية قد أعطت وسيلة لقياس خصائص كانت تفتقد لتعريفات واضحة، درجة عدم الاستواء أو التكسر أو عدم الانضباط لشكل ما. إن الشاطئ المتعرج، بصرف النظر عن قضية قياس الطول، له خصيصة ثابتة تعبر عن عدم الاستواء. وقد وضع ماندلبروت طرقاً لحساب الأبعاد الكسرية للأشكال الواقعية، وأساليب لإنشاء الأشكال بمعرفة أبعادها الكسرية، مع بيان بأن هذه الخصيصة تظل ثابتة مع تغير المقاييس. وقد اتضح بالفعل صحة الادعاء، فمهما بلغت درجة التكبير أو التصغير تظل هذه الخصيصة، درجة عدم الاستواء، ثابتة، وهكذا لا تفتأ الطبيعة تبدي صوراً من الانتظام داخل اللانظام.

وفي عصر يوم من شتاء عام ١٩٧٥، وهو بصدد وضع كتاب شامل عن أفكاره تلك، وجد ماندلبروت أنه بحاجة إلى اسم لأشكاله، ولأبعاده، ولهندسته، وباستشارة قاموس لاتيني، وقع بصره على كلمة fractus، مشتقة من الفعل frangere المقابل للفعل to break في الإنجليزية، ومصدر لكلمات مثل fracture بمعنى كسر بالمعنى الطبي، و fraction بمعنى كسر رياضي. الكلمة بدت مناسبة تماماً لأن يشتق منها الاسم المطلوب، فراكتل fractals^{iv}، [والتي سوف نطلق عليها "فراكتل، الجمع: فراكتلات"].



إن أشكال الفراكتلات في الواقع هي وسيلة لرؤية اللانهاية. تصور مثلثاً متساوي الأضلاع، طول ضلعه قدم واحدة. تصور تحولا بخطوات واضحة محددة على النحو التالي: أن تنشئ على كل ضلع عند منتصفه تماماً مثلثاً بثلاث طوله، فيكون في الخطوة الأولى بطول ثلث قدم،، بحيث تحصل فيها على ما يشبه نجمة داود السداسية. عامل كل مثلث من المثلثات الثلاثة بنفس الطريقة، وتخيل أنك مستمر في هذه العملية إلى القدر الذي تستطيعه. سوف يقترب الشكل بالتدريج من تشكيلة الكسف (بكسر الكاف، وفتح السين أو تسكينها، وهي الشرائح الرقيقة) الثلجية حين تتكون في الطبيعة. يسمى الشكل الناتج "منحنى كوخ" Koch curve نسبة إلى عالم الرياضيات السويدي هالج فون كوخ Halge von Koch الذي وصفه عام ١٩٠٤.

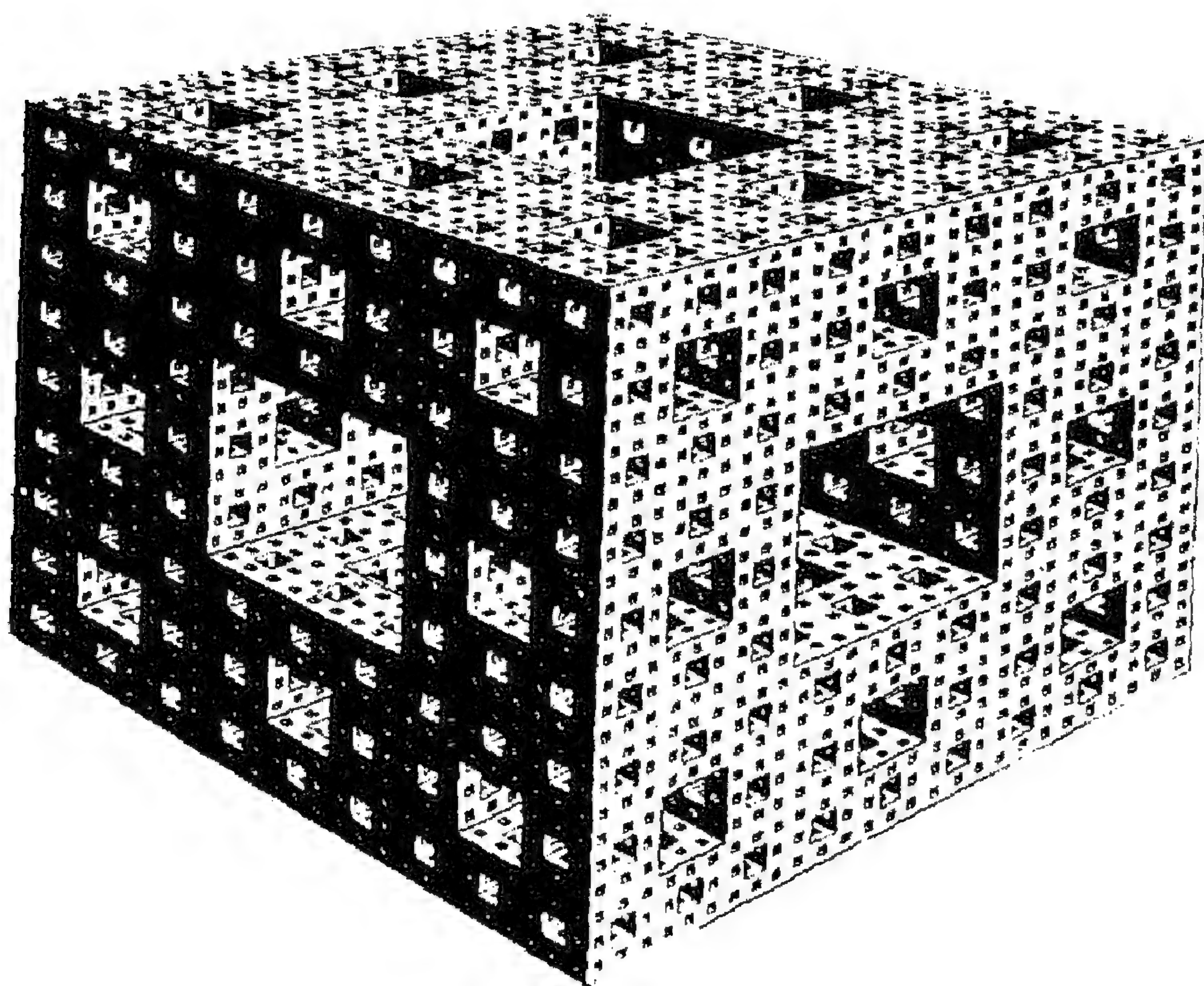
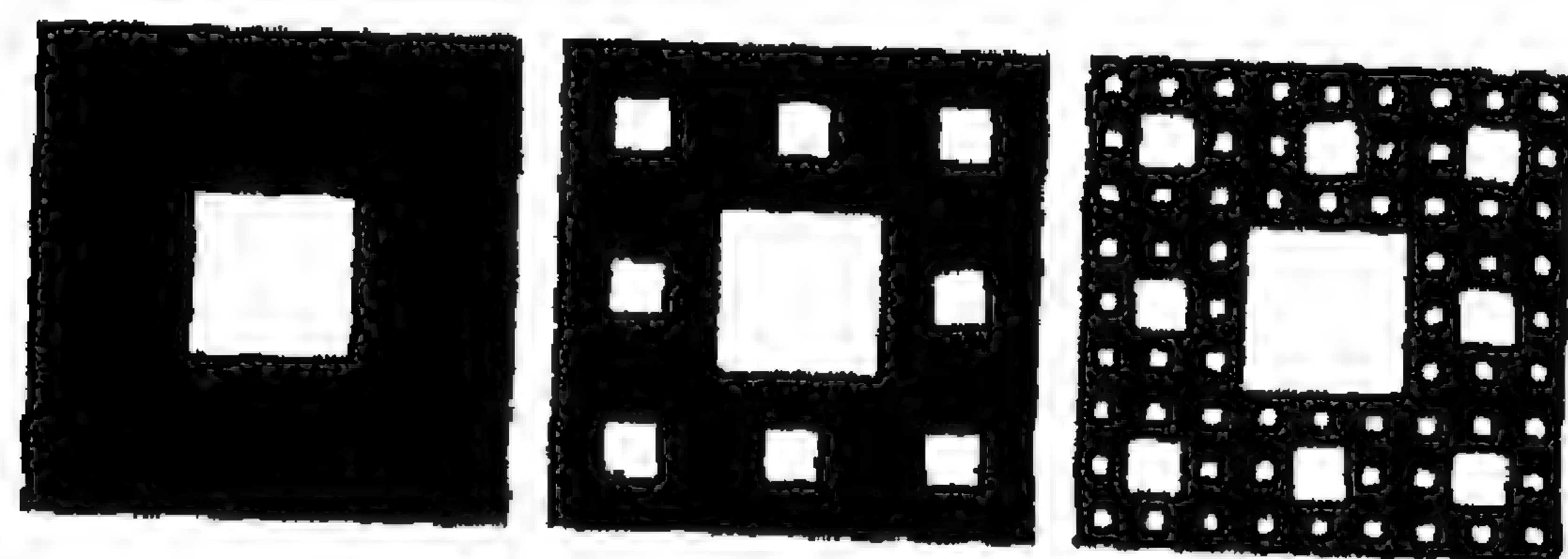


شكل ٣-٤ الكسفة الثلجية لكوخ: "نموذج تقريبي ولكن قوى للشاطيء"، كما عبر عنه ماندلبروت. لكي ترسم منحنى كوخ، ارسم مثلثا متساوي الأضلاع. عند منتصف كل ضلع، ارسم مثلثا متساوي الأضلاع بطول ضلع ثلث المثلث الأصلي. كرر العملية مع كل المثلثات الناشئة، وهكذا. إن طول الضلع للشكل هو $3 \times \frac{3}{4}$. إلى ما لا نهاية، ولكن المساحة الكلية تكون على الدوام أقل من مساحة الدائرة المحيطة بالمثلث الأصلي. وهكذا فإن خطا لانهائي الطول يضم في مساحة متناهية القيمة.

اكتشاف جديد! أصبح من الواضح أن منحنى كوخ له خصائص مثيرة. فهو أولا منحنى متصل، لا يتقاطع مع نفسه أبدا، لأن المثلثات المضافة تقل في الحجم على الدوام، وثانيا، كل مثلث يضيف مساحة جديدة للشكل، ولكن الشكل يظل محدود المساحة، حيث إنك لو رسمت دائرة حول المثلث الأصلي، فستجد أن الشكل لا يتجاوزها بأية حال من الأحوال.

ولكن المنحنى لانهائي في الطول، فكل خطوة في التحويل تزيد من طول المنحنى بنسبة واحد وثلاث. هذه النتيجة المألوفة، منحنى لانهائي الطول محصور في مساحة محدودة، بلبلت الرياضيين الذين عرفوا بهذا المنحنى. إنه منحنى فظيع، يعصف بلا هودة بالبديهيات الهندسية.

واتجه بعض الرياضيين إلى التفكير في مثل هذه الأشكال الفظيعة، ذات خصائص مستمدة من منحنى كوخ. من ذلك بساط سيرينسكي Sierpinski carpet. لتنفيذ هذا البساط، خذ مربعاً، قسمه ثلاثاً في ثلاث، لتحصل على تسعة مربعات، أزل الذي في المنتصف، وقم بنفس الخطوة على الثمانية الباقية، واستمر في ذلك.



شكل ٤-٤ إنشاء تراكيب بواسطة الثقوب: قليل من الرياضيين في أوائل القرن العشرين من تصوراً أشكالاً فظيعة تصنع من عدد لانهاى من الحذف والإضافة. أحد

هذه الأشكال هو سجادة سيربنسكى Sierpinski carpet، تصنع عن طريق حذف تسع مربع من وسط المربع الأصلي (فوق)، ثم التسع من منتصف كل مربع متبق، وهكذا. المقابل الفراغى لذلك هو إسفنجة منجر Menger sponge الذى يحتوى على مساحة سطح لانهائية، ولكن حجم يساوى الصفر.

لا يمكن للذهن أن يتصور التعقد الذى يحصل من التكرار إلى مالا نهاية، ولكن بالنسبة لشخص له موهبة تصور الأشكال الهندسية، هذا التكرار للهيكل على مدى أدق وأدق، يمكن أن يفتح له عالما بأسره. وقد استمتع ماندلبروت بهذه الأشكال استمتاعا طفوليا، متصورا تغيرات لم يتصورها أو يفهمها أحد من قبل. كان لا يفتأ يضع لها الأسماء: الخيوط، الصفائح، الإسفنجيات، الزبد، الحشايا.

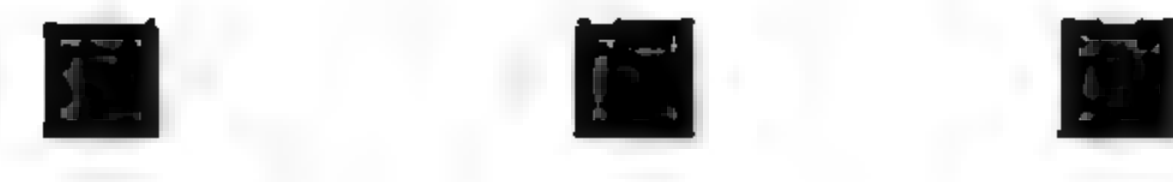
وبدا أن الأبعاد الكسرية هي الأداة المناسبة تماما. بمعنى معين، اتضح أن درجة اللانظام تعتمد على كفاءة الجسم فى شغل الفراغ. فالخط الهندسى لانهاى الطول، ولا يشغل شيئا من الفراغ بالمرّة، وهو ذو بعد واحد. ولكن منحنى كوخ، والذى هو أيضا لانهاى الطول، يشغل حيزا من الفراغ، لكونه يحيط بمساحة محدودة. إنه إذن أكثر أبعادا من المستقيم، ولكنه لا يصل لدرجة السطح الهندسى ذى البعدين. وبأسلوب قديم رياضى عفى(*) عليه الزمن استطاع ماندلبروت أن يحسب أبعاد هذا المنحنى، والذى ينتج من ضرب محيط المثلث الأصلي فى واحد وتلث إلى مالا نهاية، فوجده بالضبط ١.٢٦١٨.

وفى استمراره فى هذا الطريق، كان لماندلبروت ميزتان على أقرانه الذين فكروا مثله فى هذه الأشكال. الأولى هي إتاحة استغلال قدرة الحاسوب. لقد كان الرياضيون بدونهم قد وصلوا بقدرتهم الحسابية إلى نفس موقف البيولوجيين قبل اختراع المجهر. إن ماندلبروت يريد أن يجرى تحويلات ذات قواعد بسيطة آلاف بل ملايين المرات. وحين استغل الحاسوب فى ذلك، استخرج نتائج لم تكن متوقعة بالمرّة.

الميزة الثانية هي الصورة التى كونها عن الطبيعة منذ تحليل أسعار القطن، وتشويش خطوط الاتصالات، والتى بدأت تتبلور الآن. إن دراسته للأنماط غير المنتظمة للعمليات الطبيعية واستكشافاته للأشكال المعقدة إلى اللانهاية قد تقابلا فى نقطة، ألا وهي "التماثل الذاتى self similarity". أصبح مصطلح fractal يقابل التماثل الذاتى.

والتماثل الذاتى يقصد به التماثل على مختلف المقاييس. إنه يعنى أنماطا داخل أنماط، وهو يعنى ضمناً "المعاودة recursion". خرائط أسعار القطن وخرائط الأنهار قد بينت تماثلاً ذاتياً، ليس فقط لأنها بينت تفاصيل أدق وأدق، بل لأنها أنتجت أيضا

تفاصيل بقياسات ثابتة. إن الأشكال المخيفة مثل منحنى كوخ تُبدى تماثلا ذاتيا لأنها تُظهر نفس الشكل مهما كانت درجة التكبير^٧. إن التماثل الذاتي مبنى فى صميم أسلوب إنتاج المنحنيات، نفس التحويل يُطبق مرات ومرات على مقياس أصغر وأصغر. والتماثل الذاتي، والمعاودة المتضمنة بها، خصيصة سهلة التمييز، كما أن صورها موجودة فى كافة أنحاء الفكر. شخص واقف بين مرأتين متوازيتين، فتعكس صورته على هذه المرآة، ثم على تلك، وهكذا إلى ما لا نهاية، وكذلك فى الصورة الكاريكاتيرية لسمكة تأكل سمكة تأكل سمكة، وهكذا.



فى الجانب الشمالى الغربى من الولايات المتحدة، يُعتبر أفضل مكان لدراسة الزلازل هو مرصد لامونت-دورتى الجيوفيزيقي بولاية نيويورك، غرب نهر هادسون. فى هذا المرصد بدأ كرسستوفر شولتز Christopher Scholtz - بجامعة كولومبيا والمتخصص فى طبيعة الأرض - فى التفكير فى أشكال ماندلبروت.

فى الوقت الذى كان فيه الرياضيون والفيزيائيون يتجاهلون هذا النوع من الهندسة، كان شولتز البراجماتى النزعة على استعداد لتقبلها. كان أول لقاء بماندلبروت فى الستينات، حينما كان الأخير يعمل بالاقتصاد والأول حديث التخرج منكب على دراسة سؤال عويص متعلق بالزلازل. كان من المعروف لعشرين سنة خلت أن الزلازل، كبيرها وصغيرها، تتبع نمطا رياضيا خاصا فى توزيعها، يماثل النمط الذى قال به ماندلبروت عن توزيع الدخل فى اقتصاد السوق الحرة. كان نمط الزلازل ملحوظا فى كل مكان تقاس فيه الزلازل على الكرة الأرضية. وكان من المثير إمكانية معرفة أية عملية فيزيائية تؤدي لهذا الانتظام، على الأقل بالنسبة لشولتز، حيث كان غيره من المشتغلين بهذا العلم يكتفون بتسجيل الظاهرة، ثم يمرون عليها مر الكرام.

وفى عام ١٩٧٦ وقع فى يد شولتز كتاب لماندلبروت، مدعم بالصور التوضيحية والمعادلات الرياضية، معنون باسم "*Fractals: Forms, Chance and Dimensions*". وكان المؤلف قد جمع فى كتابه هذا كل ما يعرفه أو يظن أنه يعرفه عن الكون. فى غضون سنوات قليلة كان هذا الكتاب، وبديله الأكثر تنقيحا واتساعا: "*The Fractal Geometry of Nature*" قد حققا أعلى مبيعات لكتب فى الرياضيات العليا.

كشأن قلة من العلماء فى مجالات أخرى، من الذين شغلوا أنفسهم بالجانب المادى من الطبيعة، قضى شولتز عدة سنوات يحاول أن يتصور ما الذى يفعله بذلك الكتاب.

كان لديه غرام بالسطوح، وكان الكتاب ممثلاً بها. ووجد نفسه لا يستطيع أن يكف نفسه عن التفكير فيما تثيره أفكار ماندلبروت، ومن ثم بدأ يستخدم أشكاله في وصف وتصنيف وقياس أجزاء عالمه العلمى.

وسرعان ما اكتشف أنه لم يكن وحيداً، رغم أن مؤتمرات وندوات أشكال ماندلبروت لم تر النور إلا بعد ذلك بعدة سنوات. فأفكار هندسة ماندلبروت وجدت بين العلماء الذين كانوا يظنون أن ملاحظاتهم كانت شيئاً خاصاً بهم فقط، وكانوا لا يجدون وسيلة لوصفها. لقد ساعدت هذه الهندسة العلماء فى فهم كيفية انصهار الأشياء معاً، وتبعثرها عن بعضها البعض، وتهشمها. إنها وسيلة للنظر إلى المواد، الأسطح المجعدة مجهرىاً للمعادن، والثقوب الدقيقة للصخور المسامية الحاملة للبترول، والطبيعة المهشمة لمنطقة زلازل.

وكما رأى شولتز الأمر، فإنه موكول لعالم الجيوفيزياء وصف سطح الأرض، ذلك السطح الذى يشكّل شاطئاً عند التقائه بالمحيط. وفى خلال السطح العلوى الصلب للأرض تكمن أسطح من نوع آخر، أسطح ممثلة بالشقوق. فالتصدعات والكسور تهيمن على هيكل سطح الأرض لدرجة أنها أصبحت المفتاح لوصفه وصفاً جيداً، كما أنها تتحكم فى سريان الموائع فى باطن الأرض، الماء والبترول والغاز الطبيعى. كما تتحكم أيضاً فى تصرفات الزلازل. إن فهم الأسطح كان فى غاية الأهمية، ومع ذلك فقد كان شولتز يعلم أن مجاله العلمى فى مأزق، حيث لا يوجد إطار علمى لذلك.

فالجيوفيزيائيون ينظرون للأسطح نظرة أى فرد آخر، شكل من الأشكال، قد يكون مسطحاً، وقد يكون على أى شكل آخر. بإمكانك مثلاً أن تنظر إلى الملامح العامة سيارة من طراز الفولكس فاجن المعروفة باسم "الضفدعة"، ثم ترسم سطحها كمنحنى يمكن قياسه على أسس الهندسة الإقليدية، وأن تضع معادلة تصفه. من وجهة نظر شولتز تكون قد نظرت للسطح من منظور خاص، كما لو كنت تنظر للكون من خلال مرشح لوني أحمر، فلا ترى إلا ما هو متفق مع هذا اللون، وتحرم من ثراء الطيف اللوني الكامل. والطيف فى هذا التشبيه يقابل المقاييس من تصغير أو تكبير. فنظرتك لجسم سيارة الفولكس فاجن كمنحنيات إقليدية تعبر عن نظرة مراقب على بعد عشرة أمتار مثلاً، أو مائة متر، فماذا عن مراقب على بعد كيلومتر، أو مائة كيلومتر؟ وماذا عن بعد سنتيمتر، أو ملليمتر، أو ميكرون؟

تصور مراقباً ينظر للأرض من ارتفاع مائة كيلومتر فى الفضاء، فعلى هذا المقياس لن تكون السيارة إلا مجرد انبعاج من الانبعاجات التى يراها تغطى سطح الأرض، مجرد لمحة من لمحات العشوائية.

وبتقريب النظر أكثر وأكثر من خلال تلسكوب مثلاً، نجد أن السطح يبدأ في التشكُّل، سلساً ناعم الملمس أولاً، ثم تبدأ التعرُّجات والانبعاجات تظهر على السطح، في عشوائية ظاهرة، إنها تبدو هيولية.

ووجد شولتز أن هندسة ماندلبروت تعطي أداة قوية لوصف انبعاجات سطح الأرض، كما وجد علماء المعادن (الميتاليرجي) نفس الشيء لوصف أسطح الأنواع المختلفة من الحديد. فقد وجد مثلاً أن البعد الكسري لسطح المعدن يعطي فكرة عن مدى متانته. كما يعطي بالنسبة للأرض فكرة عن خصائص هامة أيضاً. فكر شولتز في منحدر جبل. على البعد يرى مسطحاً إقليدياً ذا بعدين، وحين يقترب منه الباحث، فإنه يجد نفسه سائراً فيه أكثر من سائر فوقه، فقد تحلّل إلى كتل صخرية قد تصل الكتلة إلى حجم سيارة، وأن البعد الفعلي قد أصبح ٢,٧، حيث أصبحت الأسطح الصخرية تحيط بالمكان لتشغل تقريبا الفراغ ثلاثي الأبعاد، مثل كتلة من الإسفنج.

كما وجد الوصف من خلال أشكال ماندلبروت تطبيقات مباشرة في مجموعة من المسائل المرتبطة باتصال الأسطح بعضها ببعض، كاتصال أسياخ الحديد بالخرسانة، أو الاتصال بين الأجزاء الميكانيكية، أو بين الأجسام الموصلة للكهرباء. لمثل هذه الاتصالات بين الأسطح خصائص تعتمد على نوع المواد المتلاصقة، بل اتضح أنها تعتمد على الأبعاد الكسرية للانبعاجات التي تكون على سطحى التلاصق. ومن أقوى النتائج التي تمخضت عن تطبيق هندسة ماندلبروت على الأسطح المتصلة أنها لا تتلاصق في أى مكان على الإطلاق. إن انبعاجات الأسطح تمنع ذلك، وعلى أى مقياس. الصخور التي تكون تحت ضغط شديد للغاية، تض على مقياس غاية في الصغر محتوية على فراغات تسمح بتدفق الموائع.

وأصبح شولتز معروفاً بين أقرانه بأنه من القلائل الذين يتعاملون مع هندسة ماندلبروت، وكان يعلم أن البعض منهم ينظر إليه كشخص غريب الأطوار، وأنه حين يذكر شيئاً عن أشكال ماندلبروت فهو إما أن يثير الإعجاب لحدثة علمه، أو يؤخذ على أنه إنسان نشاز. وحتى كتابته للأبحاث كانت تمثل لديه مشكلة، هل يكتب للقلة التي تفهم هذه الهندسة الحديثة، أم للكثرة الذين لا يفهمونها. أما هو فقد كان مقتنعا تماماً بأن هندسة ماندلبروت لا غنى عنها.

"إنها نموذج وحيد يمكننا من التعامل مع مدى تغيرات الأبعاد على الأرض. إنها تعطيك أدوات رياضية وهندسية للوصف والتنبؤ. فما أن تتعرف على المسألة، وتعلم

نمط التفكير، حتى تجد نفسك قد بدأت في فهم الأشياء وإجراء القياسات بطريقة جديدة تماماً. لقد تولدت لديك رؤية جديدة، أوسع وأرحب"



كم حجم هذا؟ كم عمر ذاك؟ سؤالان يدور حولهما العلم في أغلب أنشطته، وهما من الأسئلة الأولية في طريقة نظر الناس للعالم لدرجة تخفى عنهم أنهما يحملان شيئاً من التحيز. فهم يعتقدون أن الحجم والمدة، وهما كميتان تعتمدان على المقياس بطبيعتهما، يمكن بهما وصف الأشياء وتصنيفها. فحينما يصف بيولوجي الجسم البشري، أو فيزيائي الكوارك^{١٠}، فإن السؤال عن مقدار الحجم أو المدة يكون سؤالاً مناسباً. فالكائنات مقيدة بمقياس معين، يكون هو المتحكم في طبيعة هيكله. تخيل لو أن الإنسان بلغ في حجمه ضعف ما هو عليه الآن، عندئذ سوف ينهار هيكله العظمي تحت ضغط وزنه. إن المقياس هنا مهم.

على أن فيزياء الزلازل لا تعتمد على المقياس، فالزلازل الكبيرة هي بالضبط صورة مكبرة من الزلازل البسيطة. وهذا يميز الزلازل عن الكائنات مثلاً، فكائن ذو عشر بوصات حجماً يختلف في هيكله تماماً عن آخر ذي بوصة واحدة، وهذا بدوره يختلف جذرياً عن آخر ذي مائتي بوصة، كل يحتاج إلى طبيعة هيكل مختلفة تماماً عن الآخر. أما السحب، على الجانب الآخر، فظاهرة مقياسية scaling phenomena تماماً كالزلازل. فعدم انتظامها، معبرٌ عنه بالبعد الكسري، لا يتغير بالمرّة حين يتغير مقياس النظر إليها. لهذا السبب يصعب على المسافرين بالطائرة تصور بعد السحاب عنهم، إلا إذا ساعدتهم على ذلك عوامل أخرى كقلة الكثافة. وقد بينت تحليلات صور الأقمار الصناعية في الواقع بعداً كسرياً لا يتغير في السحب التي صوّرت على بعد مئات الأميال

ومن الصعب الخروج على عادة السؤال عن طبيعة الأشياء عن طريق الحجم والمدة. ولكن مبدأ هندسة ماندلبروت هي الآتي: بعض عناصر الطبيعة يكون النظر إليها من خلال مقياس معين نوعاً من التضليل. خذ العواصف مثلاً، إنها تعرف عن طريق تعريفات لحجمها، ولكنها تعريفات فرضها الإنسان على الطبيعة، ففي الواقع، يعرف كل علماء الطبيعة الجوية أن اضطراب الهواء ذو مقياس متصل، من زوبعة صغيرة تثار في ركن في مدينة إلى دوامة عنيفة يمكن أن تراقب من الفضاء. إن التصنيف يعتبر فكرة خاطئة. فطرفا المقياس المتصل من نفس طبيعة منتصفه.

وقد ظهر أن بعض معادلات تدفق الموائع لا علاقة لها بالحجم فى كثير من المواقف، بمعنى أنها تُطبَّق دون النظر إلى المقياس. فجنّاح طيارة مصغّر ورفاص سفينة مصغر يمكن أن يُختبَرَا فى النفق الهوائى وفى حوض السفن، وأيضاً، مع استثناءات بسيطة، العواصف الكبيرة تشبه الصغيرة.

والأوعية الدموية، من الأورطى إلى الشعيرات، تصنع أيضاً مُتَّصلاً^{vii}. فهى تتشعب وتنقسم ثم تتشعب وتنقسم، إلى أن تصبح من الصغّر بحيث تضطر خلايا الدم أن تسير فيها فى صف واحد. إن طبيعة تشعبها تخضع لهندسة ماندلبروت، وهيكلا يماثل بعضاً من الأشكال الفظيعة التى فكّر فيها. فقد دعت الضرورة إلى أن تقوم الأوعية الدموية بعملية سحر فى نطاق الأبعاد. بالضبط كما قام منحنى كوخ بتكديس خط لانهاى الطول فى مساحة محدودة، على النظام الدورى أن يكُدّس مساحة هائلة فى حيز محدود. فمن وجهة نظر المصادر المتاحة، يعتبر الدم شيئاً غالياً، والمساحة قضية حاسمة. لقد بلغ من كفاءة استغلال هندسة ماندلبروت أنه فى أغلب الأنسجة لا تبعد خلية واحدة عن النسيج بأكثر من حجم ثلاث أو أربع خلايا. على أن الدم والأوعية تشغل حيزاً محدوداً للغاية، ليس أكثر من خمس الحجم من الجسم البشرى.

هذا التشكيل الفائق الدقة، شجرتان ملتفتا الأغصان من الأوردة والشرابين، ليس استثناءً بأية حال من الأحوال. فالجسم البشرى مليء بهذه التعقيدات. فى الجهاز الهضمى، تُبدى الأنسجة تجاعيد تضم تجاعيد. والرئة أيضاً، تريد أن تضم أكبر مساحة ممكنة فى أضيق فراغ ممكن. فمقدرة الكائن على الاستفادة من الهواء تتناسب مع سطح رئتيه. وزيادة فى تعقيد الموقف، يجب على متاهة الشعبات الهوائية أن تختلط بكل كفاءة مع الأوردة والشرابين.

يعلم كل طالب طب أن الرئتين مصممتان لتضمنا مساحة ضخمة. ولكن علماء التشريح متعودون على النظر إلى مقياس محدد فى كل مرة على حدة. مثلاً، إلى ملايين الأكياس الهوائية التى تنتهى بها الشعبات الهوائية. وتخفى لغة علم التشريح الوحدة على مستوى المقاييس. بينما أسلوب أشكال ماندلبروت-على النقيض- يستوعب الهيكل بأكمله بمعرفة التشعبات التى يعملها، تشعب يتصرف بطريقة ثابتة مهما اختلفت المقاييس، من أكبرها إلى أصغرها. ويصنف البيولوجيون الأوعية على أساس من أحجامها، وهو تصنيف قد يكون مجدياً فى مواضع معينة، ولكنه لا يمنع من أن تتور مشكلة الحدود بين تصنيف وآخر، مما يفتح باباً للبلبلة.

ليس عندما نشر ماندلبروت آراءه عن الفسيولوجيا، ولكن بعد ذلك بعقد من الزمان، بدأ بعض البيولوجيين يتفهمون التنظيم الذي يحكم هياكل الجسم البشري برمته مُوصِّفاً بلغة هندسة ماندلبروت، وقد اتضح مدى ملاءمتها لمجالهم العلمي. فالنظام الذي يجمع البول اتضح أنه من نفس طبيعة تلك الهندسة، وكذلك قناة المِراة في الكبد، وشبكة الألياف التي تنقل النبضات الكهربائية للعضلات. وبالنسبة لأبحاث القلب، فقد ظهر فرع مثير للغاية، إذ اتضح أن التوقيت بين نبضات عضلات النصف الأيمن والنصف الأيسر من القلب لها تأثير خطير على سلامة القلب. ورأى المتشبعون بفكر الهيولية أن هذا التوقيت، مثله في ذلك مثل الزلازل والدورات الاقتصادية، يتبع قوانين هندسة ماندلبروت.

كيف أمكن للطبيعة أن تصمم مثل هذا التعقد؟ يرى ماندلبروت أن التعقد يكمن فقط في الفكر الإقليدي. أما طبقاً لمفاهيم هندسته، فالتشعب يتبع قوانين بسيطة، يكفي لشرحها كمُضئيل من البيانات. ربما كان "الدنا" D.N.A يختزن قواعد تحويل بسيطة كتلك التي مرّت بنا في منحنى كوخ وسيربنسكي، بدلاً من أن نتصوره قد اختزن كافة معلومات التشعبات الهائلة في الجسم، وهو تصور غير محتمل.

"بدأت أبحث في مخلفات تاريخ العلم عن هذه الظاهرة، لأنني كنت موقناً بأن ما ألاحظه ليس استثناءً، بل لعله واسع الانتشار. لقد حضرت العديد من المحاضرات، وقرأت الدوريات غير المألوفة، وكثيراً ما كنت أخرج بلا طائل. ولكن في النهاية كسبت الرهان."

بعد أن شحن ماندلبروت كتابه بكل ما جمعه من أفكار طوال حياته عن الطبيعة وتاريخ الرياضيات، تبوأ مركزاً أكاديمياً مرموقاً. كان محط أنظار هواة حضور المحاضرات، بمجموعاته من الشرائح الشفافة وشعره الأبيض المتهدل. بدأ في جمع الجوائز وألقاب الشرف، وأصبح معروفاً للمجتمع غير العلمي كما هو في المجتمع العلمي. من جهة بسبب الجمال الذي كان يميز أشكاله، ومن جهة أخرى لأن الآلاف من حائزي الحواشي الشخصية بدعوا يستكشفون عالمه بأنفسهم، ومن جهة ثالثة بسبب عاداته في تقديم الصقوف. لقد وضع أحد الباحثين في جامعة هارفارد قائمة بمن يمكن أن يوصفوا بأنهم مُفجرو ثورات في تاريخ العلم، فحصرهم في ستة عشر، منهم ماندلبروت.

على أنه بالنسبة لمتخصصي الرياضة البحتة، يعتبر ماندلبروت شخصاً خارجياً، يصارع بكل قواه في حلبة السياسة العلمية. وفي أوج قمته، كان موضع لزم من بعض

زملائه، بمقولة أنه مختال بما حققه من شهرة، وأنه قد طغى على حقوقهم فى التقييم. ليس من شك فى أنه فى فترة انشغاقه العلمى قد اكتسب مهارة فى التكتيك كمهارته فى العمل على تحقيق النجاح العلمى. كان حين يرى مقالا يتضمن بعض الأفكار عن أشكاله، يسارع بالاتصال بالكاتب متذمرا بأنه لم يشر إلى كتابه كمرجع له.

وكان المعجبون به يرون أن غروره أمر مغتفر. على اعتبار ما واجهه حتى حقق الاعتراف به. بل لقد رأى البعض أنه لولا هذه الصفة لما تمكن من المواصلة فى الصراع. مثل هذا الجدل أمر وارد فى تاريخ العلم، وقد كان لماندلبروت منه نصيب وافر. إن المطلع على كتابه يرى كيف يتحدث كثيرا عن نفسه: "أنا أرى... أنا أعتقد..... لقد تصورت.... لقد بينت..... لقد صغت مصطلحا.....".

مثل هذا الأسلوب مستهجن لدى الكثيرين، الذين لم يشفع له لديهم أنه قد أشار للكثيرين من قبله كمراجع له (كلهم، كما لاحظ حاسدوه، ليسوا على قيد الحياة). لقد اتهموه بأنه يريد أن يحتل من العلم مكانة البابا، يقف فى عليائه لينشر بركاته ذات اليمين وذات الشمال على فروع العلم المختلفة. لقد قاوموه، وإذا كان من المستحيل أن يكفوا عن استخدام أشكاله وفكرة الأبعاد الكسرية التى ابتدعها، فإنهم كانوا يتحاشون ذكر اسمه بقدر الإمكان، أو ينسبون بعض أفكاره لأشخاص آخرين كلما كان ذلك متاحا. لقد بغضوا فيه-خاصة الرياضيين-دخوله بعض مجالات العلم بأفكاره، ثم خروجه منها تاركا عبء إثباتها لأناس آخرين.

إنه سؤال وجيه. إذا نادى أحد بأن فكرة ما يحتمل أن تكون صحيحة، وبرهن آخر ذلك بأدلة قاطعة، فلمن ينسب الفضل فى التقدم العلمى؟ هل مجرد التكهّن يعتبر إنجازا علميا؟ واجه الرياضيون هذا السؤال كثيرا، ولكنه قد أصبح على درجة أكبر من الأهمية حين بدأ الحاسوب يلعب دوره. أولئك الذين استخدموه لإجراء التجارب أصبحوا أقرب لعلماء الاختبارات، مما مكنهم من الوصول لاكتشافات دون اتباع الطريق التقليدى فى الرياضيات، المبني على البرهنة المنطقية.

كان كتاب مانديلبروت واسع المدى، محشوا بتفاصيل عن تاريخ الرياضيات. وفى أى طريق تؤدى إليه الهيولية، كان يدعى أنه أول من طرقه. لم يكن من المهم أن يجد أغلب القراء مراجعه غامضة، أو حتى غير مجدية. عليهم أن يعترفوا بقدرته الخارقة فى استلهاهم اتجاه التطور لمجالات لم يدرسها على الإطلاق، من علم الزلازل إلى الفسيولوجيا. كانت أجزاء منه تخلو من الإمتاع، أو حتى عثيرة للأعصاب.

ليس هذا بالأمر الجلل، فلم يقل أحد إن كل عبقرى عليه أن يلبس وجه آينشتاين المتواضع. على أنه كان على ماندلبروت أن يجيد التحايل لسنوات طويلة لإمكان عرض أفكاره. كان عليه أن يصوغها بصورة لا تثير النفور منها، وأن يشطب مقدمته التي توحى بالقدرة على التصور، حتى يضمن لها أن تُنشر. وحين نشر كتابه أول مرة باللغة الفرنسية، اضطر إلى أن يدعى أنه ليس به شيء مثير. كان يمارس الألعاب السياسية في مضمار العلم.

"كانت السياسة تتطلب استخدام أسلوب أسفتُ على استخدامه فيما بعد. كان على أن أكتب: إنه من الطبيعي أن... من الملاحظات الطريفة....". كان الأسلوب أبعد عن أن يكون طبيعياً، وأهم ما فى الأمر العناء فى التدقيق والنقد الذاتى ومحاولة الإثبات. لقد اقتضت السياسة ما يلي: لو قلت من البداية إننى على وشك القيام بتغيير جذري، لفقدت اهتمام أغلب القراء".

وحين يسترجع ماندلبروت الذكريات، يجد أن الاعتراف به قد حدث فى مرحلة متأخرة بصورة تدعو للأسف. كانت المرحلة الأولى دائماً: من أنت، وما سر اهتمامك بمجالنا؟ ثم الثانية: ما علاقة ما تقول بمجالنا، ولماذا لا تشرحه بناء على ما نعلمه بالفعل؟ ثم الثالثة: هل أنت متأكد أنها رياضيات؟ (نعم، جد متأكد) إذن، لماذا لا نعلم نحن بها؟ (لأنها قياسية، ولكنها غامضة للغاية)

فى ذلك تختلف الرياضيات عن الفيزياء. ففى الفيزياء متى أصبح فرع قديماً أو غير مجد، فإنه يدخل على الفور ذمة التاريخ. قد يثير اهتماماً أو استلهاماً تاريخياً، ولكن فرعاً من الفيزياء حين يكتب عليه الموت، فإنما يكون ذلك لأسباب جوهرية. الرياضيات على عكس ذلك، مليئة بالطرق والدروب التى لا تقود إلى أية فائدة عملية فى عصر ما، ثم تكون محور الاهتمام فى عصر آخر. إن قوة التطبيق لفكر تجريدى لا يمكن التكهن بها. لهذا السبب ينشد الرياضيون القيم الجمالية لأعمالهم، بالضبط مثل الفنانين. لهذا السبب تعرف ماندلبروت فى أبحاثه الأولى على الكثير من الأفكار السابقة التى كانت تنتظر أن يزال عنها الغبار.

ومن ثم فإن المرحلة الرابعة تكون: ما الذى يراه هؤلاء الأشخاص فى عملك؟ (أنهم لا يهتمون به قطعياً، لأنه لا يضيف شيئاً للرياضيات، بل يندeshون للغاية أن عملهم لا يمثل الطبيعة فى شيء).

وأخيراً دخلت أشكاله كأداة فعالة للوصف والقياس والتمعن فى التشكيلات غير المنظمة؛ المجعدة والمهشمة والمتلومة، شواطئ البحار وتكوينات البرد والغبار الكونى. إن

شكلا لماندلبروت يعنى هيكلا منتظما تحت ستار من تعقيد. ويستطيع طلاب المراحل المتقدمة العبث بهذه الأشكال، فهي أولية مثلها مثل أشكال إقليدس. وأصبحت البرامج الحاسوبية البسيطة أداة فعالة لإنتاج مثل هذه الأشكال.

ووجد ماندلبروت أكبر قدر من تقبل أفكاره من المشتغلين بالعلوم التطبيقية المستخدمة في مجالات النفط أو الصخور أو المعادن، وعلى الأخص في مراكز الأبحاث. وبحلول منتصف الثمانينات، على سبيل المثال، كان عدد كبير من باحثي مركز إكسون Exxon الضخم يعملون بمفهوم هندسته، وعلى نفس المفهوم كان باحثو شركة جنرال إلكتريك يعملون في مجال البوليمرات، وكذا (بشيء من السرية) في مجال أمان المفاعلات الذرية. وفي هوليوود، وجدت أشكاله تطبيقات لا تحصى في إخراج المناظر التي تصور الطبيعة، وفي المؤثرات الفنية.

إن الأنماط التي اكتشفها أناس مثل يورك وماي في بداية السبعينات، بحدودها المعقدة بين الانضباط والهيولية، كانت تحوى نظاما لا يمكن وصفه إلا على أساس العلاقة بين المقاييس الكبيرة والصغيرة. وقد بينت الهياكل الأولية للديناميكا اللاخطية أنها ذات طبيعة تنتمي لأشكال ماندلبروت الفركتلية. كما وجدت هندسته تطبيقات هامة في الفيزياء والكيمياء وعلم الزلازل وعلم المعادن ونظريات الاحتمالات والفسولوجيا. هؤلاء الباحثون كانوا مقتنعين، وكانوا يقنعون غيرهم، بأن هندسة ماندلبروت هي ملك للطبيعة.

لقد شئوا غارات شعواء على الرياضيات والفيزياء في ثوبهما التقليدي، ولكن ماندلبروت نفسه لم يحظ بالاحترام الواجب في هذين المجالين. وعلى الرغم من ذلك، لم يكن أمامهم إلا الاعتراف به. لقد قص أحد الرياضيين مرة عن كابوس ألم به، رأى نفسه فيه وقد توفى، ثم جاءه صوت من السماء يقول: "أتعلم؛ إن هناك بالفعل شيئا ما في ذلك الماندلبروت".

إن فكرة التماثل الذاتي كامنة في الواقع في أعماق الفكر. فهناك خط في الفكر الغربى يشيد بها. لقد تخيل لايبنز أن نقطة الماء تحوى الكون بأسره، محتويا بدوره على قطرات أخرى تضم أكوانا أخرى. وحين اكتُشف الحيوان المنوى لأول مرة، ظن الناس أنه على شاكلة الإنسان الكامل.

ولكن التماثل الذاتى هجر كفكرة، لأسباب وجيهة. فهي لا تتفق مع الواقع. فالحيوان المنوى ليس إنسانا في صورة مصغرة. لقد نبعت الفكرة من عدم فهم الإنسان لحقيقة

المقاييس. كيف يمكن تصور المنتهى في الصغر والمنتهى في الكبر، إلا على أساس ما هو معروف بالفعل.

وماتت الفكرة تماما باكتشاف المجهر والتلسكوب. فمع كل اكتشاف جديد، كان يبدو التغير الجذري مع تغير مقاييس العوالم المكتشفة. وفى عالم الجسيمات دون الذرية، تكاد القصة لا تنتهى أبداً، فكل معجل أقوى طاقة وسرعة يدخلنا فى عالم أصغر حجماً ومدى زمنياً، تنفرد أشخاصه بخصائص جديدة.

واللهة الأولى، تبدو فكرة ثبات الخصائص مع تغير المقاييس أقل معلوماتية، ذلك لأن العلم يتجه دائماً نحو التجزئة والتحليل إلى العناصر الأولية، وتركيز الدراسة على كل عنصر على حدة. وفى دراسة التفاعل بين هذه العناصر الأولية، يضم المطلوب منها للدراسة فقط، وهنا يمكن النظر لتفاعل عنصرين أو ثلاثة أنه على قدر كاف من التعقيد. أما قوة التماثل الذاتى فتكمن فى النظرة الشمولية، ومن ثم فهى لا تظهر إلا على مستوى أكثر تعقيداً.

ورغم أن ماندلبروت هو من قام بأكثر استخدام شامل للهندسة المتولدة عن فكرة الثبات المقياسى scaling (ثبات الخصائص مع تغير المقاييس)، إلا أن عودة هذه الفكرة للعلم قد أضحت تياراً علمياً فى الستينات والسبعينات ظهرت آثاره فى كثير من الأماكن. فالتماثل الذاتى كان موجوداً ضمناً فى أعمال لورنز، فقد كان جزءاً من فهمه الذى استلهمه من الهيكل الدقيق المتولد عن معادلاته، هيكل أحس به، ولكن لم يستطع إظهاره على حاسوبه عام ١٩٦٣، كما أن مفهوم الثبات المقياسى قد أصبح جزءاً من الحركة العلمية فى الفيزياء والتى أدت، أكثر مما أدت إليه أعمال ماندلبروت، إلى فكر الهولوية.

وحتى فى المجالات البعيدة، بدأ العلماء يفكرون على ضوء نظريات تستخدم التدرج الهرمى للمقاييس، كما فى علم التطور البيولوجي، حيث أصبح من الواضح أن نظرية متكاملة يجب أن تعيد تنظيم أنماط التطور فى الجينات، وفى الكائنات المفردة، وفى الأجناس، وفى عائلات الأجناس، فى نفس الوقت.

وربما يبدو أمراً محيراً أن يكون فهم فكرة الثبات المقياسى قد جاءت من توسيع نظرة الإنسان التى قتلت نفس الفكرة فى طور سذاجتها الأولى. وفى أواخر القرن العشرين تعرف الناس على حقائق تجمع بين المنتهى فى الكبر والمنتهى فى الصغر بصورة لم تكن لتخطر على عقل بشر من قبل، من المجرات إلى دقائق الذرة. وقد أصبحت مثل هذه الصور جزءاً لا يتجزأ من خبرات الإنسان المعاصر. وعلى اعتبار

شغف الإنسان الفطري في المقارنة والمقابلة، فقد اتجهت بعض الأنظار إلى البحث عن ملامح للتماثل بين الطرفين، وقد جاءت بعضها بنتائج بناءة.

وكثيرا ما كان العلماء المعجبون بهندسة ماندلبروت يشعرون بتوافق عاطفي بين صور الجمال فيها وبين القيم الجمالية للمدارس الحديثة في الفن، والتي ظهرت في وقت معاصر. كانوا يحسّون بأنهم يتلقون حماسا داخليا من الحضارة بأسرها. إن استلهاهم الجمال عن طريق التناسق الهندسي الإقليدي عصر قد ساد ثم ولى، ولم يعد المعماريون اليوم يعنون، كما درجوا على ذلك ردحا من الزمن، باتخاذ بناءة سيجرام في نيويورك ١٢ مثلا يحتذى في تصميم ناطحات السحاب. لماندلبروت وأمثاله كان السبب واضحا، إن التناسق الهندسي لا يتفق مع الإحساس البشري العميق بالجمال، حيث يفشل في التوافق مع الطبيعة. وقد قال جرت آيلنبرجر Gert Eilenberger، وهو عالم اتخذ النظرية اللاخطية منهجا في دراساته عن التوصيل الفائق: "لماذا تبدو صورة ظلّية لفرع شجرة عارٍ من الأوراق، منحني في مواجهة عاصفة، مفعمة بالأحاسيس الجمالية، بينما يخلو من ذلك مبنى حُشدت له إمكانيات التزيين والتنسيق الهندسي؟ إن السبب يبدو لي، وإن كان خلافيا، في النظرة العميقة الحديثة للنظم الديناميكية. إن إحساسنا بالجمال يستلهم من التوافق بين المنتظم وغير المنتظم كما تكون في الأشياء الطبيعية، السحب والجبال والأشجار وبلورات الثلج. إن أشكال كل هذه الأشياء هي عمليات ديناميكية تجمدت في صور فيزيائية، قوامها الجمع بين النظام والانظام"

إن الشكل الهندسي يتميز بمقياسه، ومن وجهة نظر ماندلبروت فإن الفن الذي يشبع هو الفن الذي لا مقياس له، بمعنى أنه يحتوى على أهم خصائصه على كافة المقاييس. ففي مقابل مبنى سيجرام يعطى مثلا من متاحف الفنون الجميلة، بكل ما فيها من حوائط كثيرة الزوايا والأركان، وميازيب ذات تماثيل بشعة، ونوافذ ذات عضادات غليظة. فالناظر للمبنى من بُعد يجد بعض التفاصيل تشد انتباهه، ومع اقترابه يتغير التشكيل مظهرها عناصر جديدة.

إن تذوق التناسق في مبنى شيء، والإعجاب بالطبيعة في صورتها الفطرية شيء آخر تماما. لقد تغيرت وجهة القيم الجمالية، وتجاوب العلم مع هذا التغير. لقد وجد العلم أخيرا فائدة من أشكال كانتور وكوخ، التي شهدت الانفصال بين الرياضيات والفيزياء في مطلع القرن، بعد أن تعايشا معا منذ عصر نيوتن. فالرياضيون من أمثال كوخ وكانتور كانوا فخورين بتميز مجالهم، متصورين أنهم قد بزوا الطبيعة في الذكاء،

بينما هم في الواقع لم يتفهموا قدرتها على الخلق والإبداع. فقط على يد سمول عادت الرياضيات لتخدم النظم الديناميكية.

على أنه على الرغم من سمول وماندلبروت، كان مقدرا للفيزيائيين أن يكونوا هم من وضع أساس علم الهولوية. ولقد قدم ماندلبروت اللغة المطلوبة، وكما من الاشكال المدهشة عن الطبيعة. وكما اعترف هو نفسه، إن برنامجه يصف أكثر من أن يشرح. فمن الممكن أن يقدم عناصر للطبيعة، مع أبعادها الكسرية، تفيد العلماء في عمل التنبؤ، ولكن الفيزيائيين يريدون معرفة المزيد، إنهم يبحثون دائما عن العلة. إن هناك الكثير من الأشكال-ليست منظورة-بل متغلغلة في ثنايا نسيج الحركة، تنتظر أن يكشف عنها.

i مرجعنا في نطق الاسم هو الصديق المهندس عادل سيد عبد الجواد، خبير واستشاري حاسبات، والذي درس علم الهولوية باستفاضة خلال إقامته بألمانيا وفرنسا. المترجم.

ii توجد أساليب في إرسال النبضات الحاملة للبيانات، تساعد على اكتشاف الأخطاء الناتجة عن التشويش error detection وتصحيحها error correction تعتمد على عملية تكويد الإشارات coding، والعلم الذي يتناول هذا الموضوع يسمى "نظرية المعلومات Theory of information"، سوف نلتقي به في الفصل السابع- المترجم.

iii بالطبع للشواطئ طول محدد، ولكن الشكل الفراكتلي المثالي الذي يمثلها طوله مالا نهاية، إذ كلما صغر مقياس القياس زاد الطول، وهذا هو معنى العبارة الواردة في المتن "من منظور معين". المترجم.

iv هذا المصطلح لحدثه ليس شائعا في القواميس العلمية، وقد ورد مقابله في قاموس الرياضيات المصور، الناشر مكتبة لبنان، "تشكيل جزئي، سطح أو منحنى جزئي"، وفي قاموس موسوعة مصطلحات الحاسوب، للدكتور علم الهدى حماد، الناشر American Global "متشكلات"، ونرى أن كلا الترجمتين لا يصلحان للتعبير عن المصطلح، علاوة على صعوبة الاشتقاق منهما. كما ورد في مقابل في مجلة العلوم التي تصدرها دولة الكويت هو "كسرانيات"، ولكننا نفضل تعريب المصطلح إلى: "قراكتل، الجمع: فراكتلات"، كما يمكن أن نطلق عليها "أشكال ماندلبروت" نسبة إلى مكتشفها- المترجم.

v لاحظ أن تكبير دائرة مثلا يخفي شكلها الحقيقي، بحيث يمكن أن تتصور كخط مستقيم عند درجة كبيرة من التكبير، وهو ما يجعل الواقف على الأرض لا يكتشف كرويتها، بل يتصورها مسطحة، وينطبق هذا القول على كافة الأشكال الهندسية التقليدية- المترجم.

vi جسيم بون ذري يتكون منه جسيمات أثقل مثل البروتونات والنيوترونات- المترجم.

vii يفرق في التعريف بين الظاهرة المتصلة continuum والمجزأة discrete، وأفضل تشبيه لذلك تحرك بواسطة السلم الكهربائي مقابل ارتقائك السلم المعتاد ذو الدرجات- المترجم.

الجاذب العجيب

حين تستحيل التيارات السلسلة إلى دوّامات مضطربة، فإنها تمثل مشكلة لها وزنها، فُكر فيها كل الفيزيائيين العظماء، بصورة رسمية وغير رسمية. إلا أن أغلب الأفكار كانت تأتي من الرياضيين، فبالنسبة للفيزيائيين تُعتبر هذه الاضطرابات ظاهرة فيها من الغموض ما يجعلها لا تستحق البحث.

لقد وصل الموقف بين الفيزيائيين في دراسة التيارات إلى حل اصطالحوا عليه، فهم قد رسموا خطأ تقع على جانب منه التيارات المضطربة، والتي صرفوا النظر عنها، وعلى الجانب الآخر توجد التيارات السلسلة، وهو الجانب الذي وجدوا فيه مجالاً خصباً للعمل. ففي هذا الجانب تسير التيارات سيراً حسناً، إذ لا تتصرف كما لو كانت مكوناً من ملايين القطرات المستقلة عن بعضها؛ فكل قطرتين متجاورتين يظلان على نفس التجاور، كحصانين في مضمار. وللمهندسين أساليبهم في التعامل مع التيارات، طالما كانت مستقرة. وهم في ذلك يستخدمون معلومات تعود للقرن التاسع عشر، حينما كانت حركة السوائل والغازات في مقدمة موضوعات الأبحاث.

ولكنها لم تعد كذلك في القرن العشرين. لقد قُتل موضوع ميكانيكا الموائع fluid mechanics حتى لم يعد فيه مجال لمزيد من التفكير. وكان الجانب التطبيقي مفهوماً لدرجة إمكانية تركه للفنيين، فلم يعد الموضوع قسماً من أقسام الفيزياء، بل من أقسام كليات الهندسة. وكان التعامل مع الجانب التطبيقي للاضطرابات يسير في اتجاه واحد، القضاء عليها بأيّة صورة! في بعض التطبيقات تكون الاضطرابات مرغوبة، داخل محرك نفاث مثلاً، حيث تعتمد كفاءة الاحتراق على سرعة المزج. ولكن في الأعم الغالب تمثل الاضطرابات كارثة، فتيار هوائي مضطرب يدمر قوة الرفع على جناح الطائرة. بل إن أموالاً طائلة تُنفق على تصميم الطائرات والمحركات الطوربيئية والرفاصات وأبدان الغواصات، والأشكال الأخرى التي تسير في أوساط من الموائع. كما تشمل الأبحاث تدفق الدم في الأوعية الدموية، وشكل وتطور الانفجارات، والدوامات واللهب والموجات الصدمية. في مشروع القنبلة الذرية، كانت

المسائل الجوهرية قد قاربت الحل عند بدء المشروع، وكان الشغل الشاغل للباحثين فى لوس ألاموس هى مشاكل ديناميكا الموائع.

ما هو الاضطراب إذن؟ إنه خليط من اللانظام على كل المستويات، دوّامات صغرى ضمن دوّامات أكبر. إنه حالة لا تعرف الاستقرار، مشتتة للطاقة، عشوائية الحركة. ولكن كيف يتحوّل تيار من حالة السلاسة إلى حالة الاضطراب؟ لنفرض أن لدينا أنبوباً ناعماً تماماً، زوّد بمصدر ثابت من الماء، معزول كلية عن الاهتزازات، كيف يمكن أن يتحول تيار كهذا للعشوائية؟

كل القوانين تبدو منهارة، فحين يكون التيار سلسلاً، تموت الاضطرابات الطفيفة على الفور. ولكن ما أن نتجاوز نقطة ابتداء الاضطراب، حتى تتصاعد بصورة خطيرة. وتمثل نقطة الابتداء هذه أمراً غامضاً بالنسبة للعلم، القنوات تحت الصخور لتيار مائى تتحول إلى دوّامات تكبر وتنقسم وتلف سارية مع التيار. عمود دخان من السيجارة يرتفع كاسطوانة منتظمة، ثم يتحول إلى دوّامات دوّامية بعد عبوره لقيمة حرجية من سرعته. يمكن لبداية الاضطراب أن يسجل ويقاس فى المعمل، وأن يختبر لجناح طائرة أو رفّاص سفينة، ولكن طبيعته تظل لغزاً. والمعرفة فى هذا المجال تكون خاصة لا عامة، فالتجارب على جناح طائرة بوينج ٧٠٧ لا علاقة لها بتجارب على جناح ف-١٦. حتى الحواسيب العملاقة تبدو أقرب للعجز أمام هذه الظاهرة.

شيء ما يهز السائل فيثيره. والسائل ذو لزوجة، بحيث أن الطاقة تنتشت منه. وحين يخمد الاهتزاز، يعود السائل بطبيعة الحال للسكون. فأنت حين تهز السائل تضيف طاقة له، تكون ذات تردد بسيط (طول موجى كبير)، وأول شيء تلاحظه أن الطول الموجى الكبير قد تكسّر إلى ما هو أصغر. وتتكون الدوامات، وتتكوّن دوّامات أصغر بداخلها، كل يشتت طاقة السائل ويخلق إيقاعاً خاصاً به.

فى عام ١٩٢٠ وضع أ. ن. كولموجوروف A. N. Kolmogorove وصفا رياضياً أعطى الإحساس بكيفية عمل هذه الدوامات. فقد تصور تتابعاً فى مستوى الطاقة هبوطاً إلى أصغر مقياس ممكن، إلى أن تكون الدوامات من الصغر بحيث لا تستطيع أن تتغلب على لزوجة السائل.

والحصول على وصف طيب، تصور كولموجوروف أن هذه الدوامات سوف تغطى السائل بأكمله بصورة تجانسية، ولكن اتضح أن هذا التصور غير صحيح، وحتى بوانكاريه قد أدرك ذلك منذ أربعين عاماً، حين وجد اختلاطاً مستمراً على سطح النهر

الهائج بين مناطق دوامية ومناطق من تيار سلس. هذه الصورة اللامتجانسة، حين توضع فى صورة مثالية لحد ما، فإنها تكون منتمية لأشكال ماندلبروت بقدر كبير، بما فيها من تداخل بين مناطق الاضطراب ومناطق السلاسة، على مستويات تصغر شيئاً فشيئاً. على أن هذه الصورة بدورها يتضح أنها تختلف عن الواقع إلى حد ما.

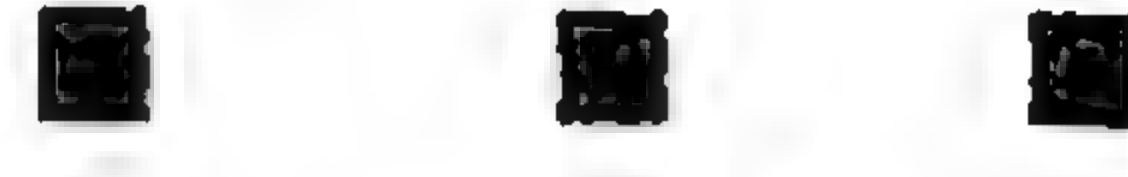
ومن الأسئلة القريبة من ذلك، ولكن متميزة تماماً، هو السؤال عما يحدث حين يبدأ الاضطراب. كيف يعبر السائل حالة السلاسة إلى حالة الاضطراب؟ ما هى الحالات البينية فيما بين الحالتين؟ لهذه الأسئلة وضعت نظرية أقوى قليلاً، وضعها العالم السوفيتى الشهير ليف لاندو Lev Landau، الذى احتل موضعاً مرجعياً فى مجال ميكانيكا الموائع. يقوم تصور لاندو على تراكم من الذبذبات، بمعنى أن كل طاقة تُضاف للنظام يبدأ معها ذبذبة جديدة فى الانضمام إلى ما هو موجود أصلاً منها، كما لو أن وتراً فى كمان يستجيب لكل زيادة فى العزف بإخراج تردد ثان وثالث.

يتكون أى سائل أو غاز من جزيئات متناهية الصغر، تبلغ من كبر العدد ما يجعلنا نتصورها لانهائية. فلو أن كل جزيء تصرف على انفراد، لكان أماناً عدد لانهائى من الاحتمالات، أو من "درجات الحرية" كما يُعبّر عنها اصطلاحاً، ولاحتوت معادلة الحركة على عدد لانهائى من المتغيرات. ولكن الجزيئات لا تتصرف على استقلال، بل ككل متكامل. وفى حالة التيار السلس، تكون درجات الحرية قليلة العدد. الجزيئات المتقاربة تسير إما متقاربة، أو تتباعد بطريقة خطية. وجزيئات الدخان المتصاعد من السيجارة تسير فى شكل أسطوانى، حتى حين.

ثم يبدأ الاضطراب. سيرك من تحركات متهيجّة، قد يعطى بعضها أسماء؛ ترددية، متأرجحة، عقدية، مغزلية، دوامية. من وجهة نظر لاندو، كل هذه الصور من الحركات تتكاثف فوق بعضها البعض، معطية خليطاً غير متجانس من السرعات والأحجام. هذه الفكرة التقليدية عن الاضطراب تبدو موافقة للواقع. وإذا كانت النظرية فقيرة المستوى رياضياً، فليكن ذلك. صورة من الاحتفاظ بماء الوجه حين رفع الأيدى بالتسليم.

يمر الماء فى أنبوب، مُصدراً همساً خافتاً. تصور أنك زدت فتحة الصنبور، مُزيداً من ضغط الماء. سوف تسمع نغمة ترددية وقد بدأت تقرع جدران الأنبوب. زد مرة أخرى، من مكان ما تبدأ ذبذبة أخرى فى الظهور، غير متوافقة مع الأولى، ولكن متداخلة معها. مع استمرار زيادة الضخ تظهر ثالثة ورابعة، ويصبح التيار معقداً للغاية. ربما يكون هذا هو الاضطراب. لقد تقبل الفيزيائيون هذه الصورة، ولكن ما من أحد كان بمقدوره حساب متى تظهر الذبذبة الجديدة، أو مقدارها. ما من أحد رأى

هذه الترددات العجيبة تجريبيا، لأنه ما من أحد فى الواقع قد اختبر نظرية لاندو عن تكوين الاضطراب.



يجرى واضعو النظريات التجارب بأذهانهم، بينما يجريها التجريبيون بأيديهم. الأول مفكرون، والآخرون مهنئون. الأول لا شريك لهم فى العمل، والآخرون لهم مساعدون، وطلاب دراسات عليا يشرقون عليهم، وفنيو المعامل. يعمل المنظرّون (واضعو النظريات) فى جو مثالي، لا ضوضاء، لا اهتزازات، لا تلوث، بينما التجريبيون قد خلقوا مع المادة ودأ كالأذى بين النحات والصلصال. المنظرّون يخلقون رفقاءهم، مثل روميو ساذج يتخيل محبوبته المثالية، أما رفقاء التجريبيين فيعرقون، ويشتكون، ويتذمرون.

لا غنى لأى منهما عن الآخر. على أنه منذ ولى زمن اجتماعهما فى شخص واحد، وصورة من اختلال التوازن قد بدت بينهما، حيث احتفظ التجريبى بشيء من شخصية المنظرّ، بينما العكس غير صحيح. وتدرجياً بدأ التبجيل يميل إلى جانب المنظرّين. ففى مجال الفيزياء عالية الطاقة، فاز المنظرّون بنصيب الأسد من الشهرة، بينما تحول التجريبيون إلى فنيين عالىي التخصص، يتعاملون مع أجهزة ومعدات باهظة الثمن غاية فى التعقيد. وقد بدا ذلك واضحاً أشد الوضوح فى مجال فيزياء الجسيمات دون الذرية، حيث تزداد المعجلات طاقة إلى حد غير متصور، كما ازداد طاقم التجارب عدداً حتى وصل إلى العشرات، بل والمئات.

ولكن ظل بعض التجريبيين يفضلون العمل فرادى أو فى مجموعات صغيرة، يعملون مع مواد فى متناول اليد. وبينما فقدت مجالات مثل ميكانيكا الموائع وضعها، اكتسب مجال "فيزياء الجوامد، أو الحالة الصلبة" solid state وضعا مرموقا، متوسعا فى مجاله حتى أصبح مع الزمن محتاجا لاسم جديد؛ "فيزياء المادة المتكاثفة condensed matter". فى هذا المجال تكون المعدات أبسط، والفجوة بين المنظرّين والتجريبيين أضيق قليلا، الأول أقل تعالياً، والآخرون أقل دفاعية.

وحتى مع ذلك، فإن وجهات النظر ظلت مختلفة. فمن المؤلف تماماً أن يقف منظرّ مقاطعا محاضرة لتجريبى قائلاً: "أليست البيانات أقل قليلا مما يجب؟ أليس هذا الشكل البيانى غامضا بعض الشيء؟ ألم يكن من الأفضل مد نطاق التجربة؟

ورداً على أسئلة كهذه، كان من المؤلف أيضاً أن يشد هاري سويني Harry Swinney قامته إلى أقصى طولها البالغ خمسة أقدام ونصف القدم، ويقول بمزيج من لهجة لويزيانا الأصلية الفاتنة، ولهجة نيويورك الفضوية: "هذا حق، لو كان لديك عدد لانهائي من البيانات الخالصة" ثم يستدير منصرفاً إلى سبورته قائلاً: "ولكن ما لديك واقعا هو عدد من البيانات المحدودة، والمعرضة للتشويش".

كان سويني تجريبياً ذا شأن، جاءت نقطة التحول حين كان طالبا مفتونا بفيزياء الجسيمات الأولية ككل قرنائه، حيث كان اسم موري جلمان^أ Maury Gell-Mann له وقع السحر عليهم. ولكنه حين نظر لما يفعله الباحثون الشبان عادة، وجد أن عملهم محصور بين كتابة برامج حاسوبية، أو تجهيز غرف الضباب. عندئذ تحدث مع فيزيائي أسن منه، يعمل في مجال تحول الطور، phase transition، كالتحول من حالة السيولة إلى حالة الصلابة، أو من حالة اللامغناطة إلى حالة المغناطة، أو من التوصيل إلى التوصيل الفائق. وسرعان ما كان لسويني حجراته، ليس أكبر كثيراً من خزانة الملابس، ولكنها كانت خاصة به، ما لبث أن عبأها ببعض أجهزة التبريد، وبعض المعدات العلمية. وصمم جهازاً لاختبار مدى التغير في قابلية ثاني أكسيد الكربون لتوصيل الحرارة عند النقطة الحرجة لتحويله من غاز إلى سائل. كان الظن الغالب أن التغير طفيف، فوجده سويني أكبر في حدود ألف مرة. كان شيئاً مثيراً، أن يكتشف وحده في غرفة ضيقة ما لم يعلمه أحد من قبل. لقد رأى الضوء الذي يشع من الغاز، أي غاز، عند تلك النقطة الحرجة، ضوء خفيف يعطى وميض مادة الأوبال.

وكمثل الحالة الهيولية بقدر كبير، يتضمن تحول الطور نوعاً من التصرف على المقياس الكبير لا يمكن أن يتوقع عند النظر للجزيئات. عندما يسخن معدن، فإن الجزيئات تتذبذب بسبب الطاقة المضافة، مجبرة المادة على التمدد. مزيد من الحرارة، مزيد من التمدد. وعند نقطة معينة، يصبح التغير فجائياً غير متصل. يتلاشى الشكل البلوري، وتنزلق الجزيئات مقابل بعضها البعض، متبعة قوانين السوائل التي لم تكن متصورة في الحالة الصلبة. الطاقة المتوسطة للذرات لم تتغير، ولكن المادة، وقد تحولت إلى السيولة، أو المغناطة، أو التوصيل الفائق، قد دخلت عالماً جديداً.

في معامل شركة AT&T Bell بنيوجرسي اختبر جينتر آلرز Günter Ahlers ما يسمى التحول السائلي الفائق superfluid transition للهيليوم السائل، والذي فيه، مع انخفاض الحرارة، تصبح المادة نوعاً من سائل سحري يسيل بلا لزوجة أو احتكاك. ودرس آخرون ظاهرة التوصيل الفائق. ودرس سويني النقطة الحرجة حيث تتحول

المادة من سائل لبخار. في منتصف السبعينات كان التجريبيون من أمثال سويني وأدلرز، من كل البلدان المتقدمة، المشتغلون بدراسة تحول الطور، ينظرون في مشاكل جديدة. لقد عرفوا العلامات المميزة لمسار تغير المادة من طور إلى آخر، ودرسوا الوضع الحرج الذي تتوازن عليه المادة.

ويحمل هذا المسار الكثير من التشابهات. تشابه بدا بين حالات التحول المختلفة. التحول من المغنطة إلى اللامغنطة، والتحول من السيولة إلى الغازية، والتحول من السيولة إلى السيولة الفائقة، والتحول من التوصيل إلى التوصيل الفائق. فالرياضيات المطبقة في تجربة ما هي ذاتها ما يطبق في تجارب أخرى. وفي السبعينات كانت المشكلة قد حُلَّتْ بقدر كبير، ولكن التساؤل كان حول مدى إمكانية بسط نطاقها. ما التحولات الأخرى في الكون، عندما تختبر عن قرب، يمكن أن تعتبر تحولاً في الطور.

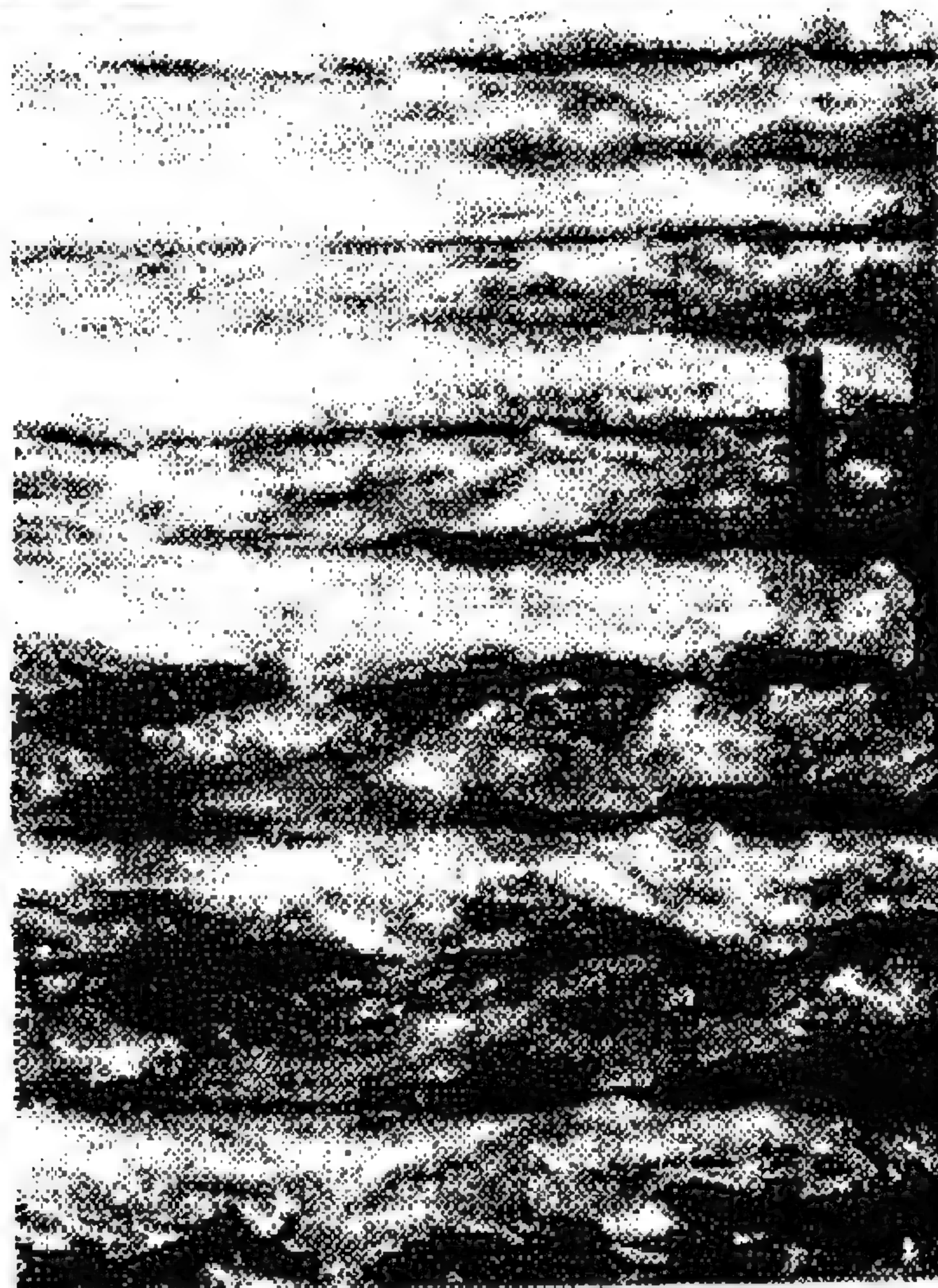
لم تكن فكرة تطبيق تحول الطور على تدفق السوائل لا هي بالفكرة الأكثر جدة ولا الأكثر وضوحاً. لم تكن الأكثر جدة لأن رواد ديناميكا الموائع، راينولد Reynold ورايلي Rayleigh قد لاحظا في مطلع القرن العشرين أن تجربة محكمة جيداً للسوائل تنتج نوعاً من تغير حالة الحركة، وبعبارة رياضية تنتج مع زيادة الحرارة ما يسمى "التفرع الثنائي bifurcation" كان الفيزيائيون ميّالين إلى اعتبار هذا التفرع يتشابه مع تغيرات تحول الطور.

ولم تكن الأكثر وضوحاً لأن هذا التفرع، على عكس تحول الطور، لم يكن يصاحبه تغير في طبيعة المادة ذاتها، بل هو بدلاً من ذلك يدخل عنصراً جديداً، الحركة. لقد تحول السائل الساكن إلى متحرك. لماذا يجب أن تتبع رياضيات هذا التغير تلك التي تخص تكاثف الغاز؟



في عام ١٩٧٣ كان سويني يقوم بالتدريس في سيتي كولاج بنيويورك، بينما كان جيرى جولب Jerry Gollub يدرس في هافر فورد. ولم تكن هذه المدرسة الريفية التي أنشئت للفن الحديث تبدو مكاناً مناسباً ينتهي إليه الفيزيائيون، حيث لم يكن بها طلبة دراسات عليا تساعد الباحثين. ولكن جولب أحب التدريس للطلاب المبتدئين، وبدأ في تطوير قسم الفيزياء إلى مركز للتجارب أصبح ويشار إليه بالبنان. وفي ذلك العام اتجه جولب إلى نيويورك ليتعاون مع سويني.

مع التشابه بين تحول الطور وعدم اتزان السوائل، بدأ الاثنان فى دراسة نظام كلاسيكى يضم سائلا محصورا بين اسطوانتين رأسيّتين ومتداخلتين، تشد الداخلية عند دورانها السائل معها حولها، وهى بذلك تحصر الفراغ المتاح للسائل، ٣ ومع ازدياد سرعة الدوران، تظهر نقطة اللاتوازن الأولى. يصنع السائل نمطا جميلا من أشكال تشبه رصّة من الكعك تحيط بالاسطوانة. فجزئيات السائل لا تتحرك فى حركة دورانية فقط، بل تتحرك أيضا إلى أعلى وإلى أسفل، وأماما وخلفا. كان هذا النمط معروفا منذ العشرينات.



شكل ١-٥ التدفق خلال الاسطوانات الدوارة: أعطت أنماط تدفق الماء بين اسطوانتين هارى سوينى وجيرى جولب طريقة للنظر إلى كيفية بدء الاضطراب. مع

زيادة معدل اللف، يزداد النمط تعقداً. في البداية يكون الشكل أشبه بفطائر متراصّة فوق بعضها البعض، ثم تبدأ الفطائر في الاهتزاز. استخدم العالمان أشعة الليزر لقياس تغير سرعة الماء مع كل اختلال في الاتزان يظهر من جديد.

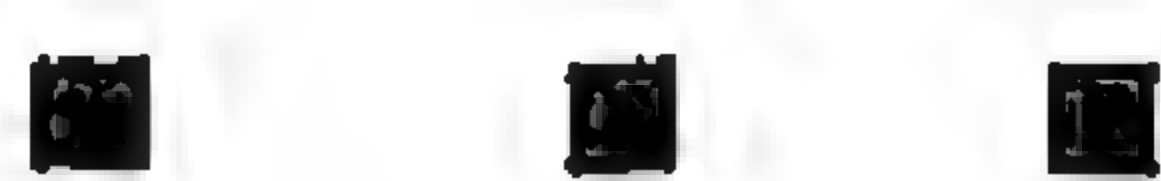
ولاستمرار الدراسة طور سويني وجولب جهازاً يصلح للوضع على مكتب، اسطوانة زجاجية خارجية في حجم علبة كرات التنس، حوالى قدم في الارتفاع وبوصتين في القطر، تنفذ خلالها برشاقة اسطوانة أخرى من الصلب، بدقة تجعل الفراغ بين الاثنين ثَمَن البوصة، حيث يتحرك السائل. وقد وصف فريمان دايسون - أحد أفراد السيل الذي لم ينقطع من زوَار العمل على مدى الأشهر التالية - المشهد قائلاً: "هذان السيدان في معملهما الضيق المزدحم، بقليل من المال، يجريان تجربة على أعلى درجات الجمال، لقد كانت بداية العمل العلمى الحقيقى للاضطرابات".

كانا يجريان تجربة في موضوع شائع، من شأنه أن يحقق لهما نجاحاً بقدر ما يصلان إليه. فكل ما هدفا إليه هو تحقيق فكرة لاندو عن بدء الاضطراب. ولم يكن هناك مجال للشك في نتيجة التجربة، فهما يعلمان أن السوائل تخضع بالفعل لفكرة لاندو، وهما معجبان بها لأنها تتفق مع الصورة العامة للتحول الطوري. وحين أجرى سويني تجربته عن النقطة الحرجة بين السائل والغاز لثاني أكسيد الكربون، كان يجريها ولديه اقتناع بفكرة لاندو لدرجة أنه توقع أن تصدق نتيجة تجربته على غاز الزينون، وهذا ما حدث بالفعل. لماذا إذن لا يحقق الاضطراب صورة التكديس المتوالى للترددات في السوائل المتحركة؟

أعدّ الباحثان عدتهما للتغلب على صعوبات قياس السوائل حين اضطرابها، بترسانة من التقنيات الحديثة والدقيقة، تمخّضت عن سنوات من دراسة تحول الطور في أشد الظروف دقة وحساسية. كان لديهما أساليب وطرق عملية للقياس لم تدر بخلد باحث في هذا المجال من قبل. فقد استخدما ضوء الليزر لسبر غور السائل الدوّار^٧ فالضوء الساقط على الماء المتحرك يعانى من انعكاس أو من تشتت يمكن قياسهما بدقة بالغة بطريقة تسمى طريقة تداخل دوبلر، ويوجه سيل البيانات إلى جهاز الحاسوب، والذي نادراً ما كان يرى وقتها في معمل على هذا المستوى.

قال لاندو أن الترددات سوف تظهر مع زيادة السرعة، تردداً بعد الآخر. ويقول سويني متذكراً: "على ذلك أخذنا في القراءة، وسار الأمر على ما يرام، نظرنا ووجدنا التحول واضحاً لا مرأى فيه، وأخذنا نزيد ونقلل من السرعة، كل شيء واضح ومحدد. قلنا لأنفسنا: حسناً، لنتجه الآن للتحول القالى".

هنا انهار توقع لاندو تماما. عند التحول التالى تراقصت جزيئات الماء فى كافة الاتجاهات، دون أى ملمح لتردد منتظم على الإطلاق. لقد فشلت التجربة فى تأييد نظرية لاندو. لا ترددات جديدة، ولا تصاعد تدريجى منتظم للتعقيد. "إن ما وصلنا إليه كان فوضى شاملة"، وبعد عدة أشهر، ظهر بلجيكى نحيل غاية فى الدماثة لدى باب المعمل.



ولد دافيد رويل David Ruelle فى جنت Ghent عام ١٩٣٥، ووجد نفسه شغفاً بالكيمياء. ورغم أنه شق طريقه العلمى فى مجال العلوم البحتة، إلا أنه كان يهيم دائماً بالجانب الخطر من الطبيعة التى تخفى مفاجأتها فى قطر عيش الغراب اللانهري، أو فى الكبريت والفحم والملح الصخرى.

ولكن دور رويل فى اكتشاف الهولوية كان فى مجال الفيزياء الرياضية. فبحلول ١٩٧٠ كان قد التحق بمعهد الدراسات المتقدمة بباريس، والذى أنشئ على غرار المعهد الذى يحمل نفس الاسم فى برينستون. وكان قد اكتسب عادة لم تفارقه طوال حياته، هى اقتطاع أوقات للقيام بالجولات الخلوية فى بقاع الأرض، من أيسلندا إلى المكسيك، ليرى العالم على فطرته على حد قوله. وكان قد سمع عن **حدوة سمول** والاحتمالات الهولوية للنظم الديناميكية، كما كان يفكر أيضا فى اضطرابات السوائل وصورة لاندو الكلاسيكية عنها، وتوَلَّد لديه ظن بوجود صلة بين الموضوعين، وأنهما متعارضان.

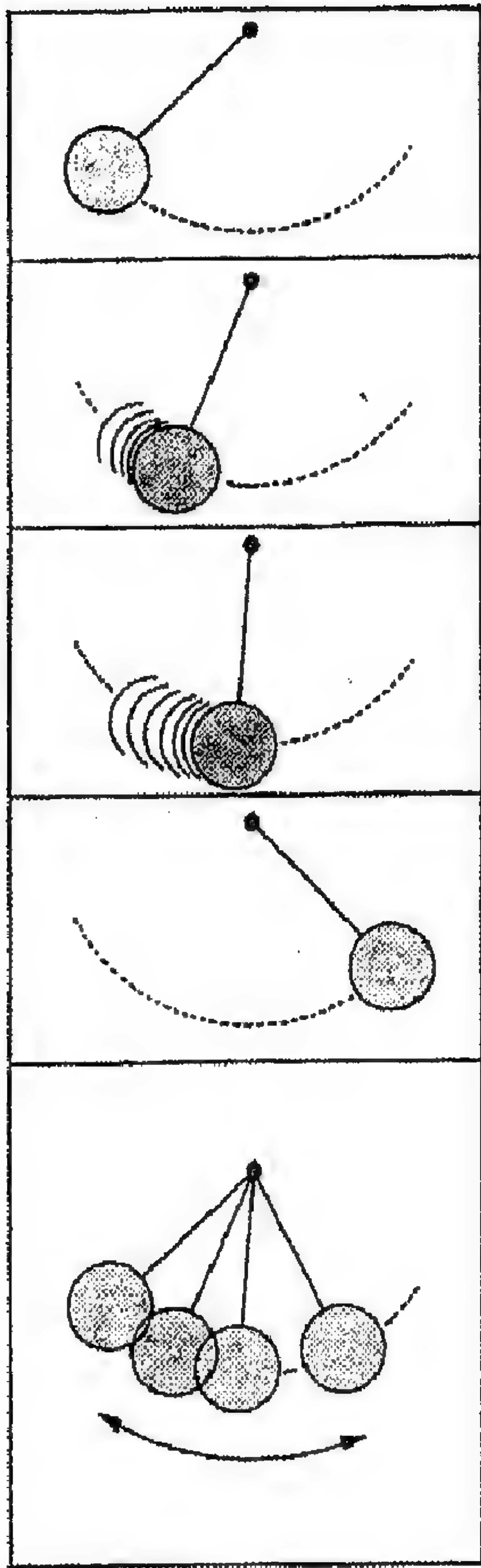
لم يكن لدى رويل خبرة بسريان السوائل، ولكن ذلك لم يقعه. كان يقول "إن غير المتخصص كثيرا ما يجد أشياء جديدة، ولم تكن هناك نظرية عميقة عن الاضطراب، فكل الأسئلة التى تسأل ذات طبيعة عامة، ولذا فهى متاحة لغير المتخصصين." كان من السهل معرفة سر امتناع الاضطراب على التحليل، فمعادلات حركة السوائل من نوع المعادلات التفاضلية الجزئية اللاخطية، وهى غير قابلة للحل إلا فى حالات استثنائية. على أن رويل كتب بحثا عن صورة بديلة لصورة لاندو، بالمشاركة مع رياضى هولندى هو **فلوريس تاكينز** Floris Takens، مصاغا بلغة سمول، حيث الفراغ يمكن التلاعب فيه بالطى والانكماش والمط إلى شئ أشبه بحدوة الحصان.

نشر البحث عام ١٩٧١، وكان يحمل نكهة رياضية لا تنكر، ومع ذلك فقد كانت به لمحة الاتصال بالعالم الواقعي. كان عنوانه "حول طبيعة الاضطراب On the Nature of Turbulence" والذي يحمل تلميحاً واضحاً إلى بحث لاندو "حول مسألة الاضطراب On the Problem of Turbulence". كان من الواضح أنهما يقدمان بديلاً لفكرة لاندو عن بدء الاضطراب. بدلاً من تراكم الترددات، مما يؤدي إلى عدد لانهائي من التحركات المتداخلة وغير المترابطة، اقترحا ثلاثة عناصر من الحركة فقط يمكن أن تنتج التعقد الكامل للاضطراب. من وجهة النظر الرياضية كان البحث غامضاً، أو خاطئاً، أو منقولاً، أو الثلاثة معاً، آراء ظلت متعارضة لخمس عشرة عاماً تالية.

ولكن ما كان في البحث من نفاذ بصيرة، وتعليقات، وحواش، وفيزياء مُضمَّنة، جعلت منه هبة خالدة، أهم ما فيها كانت الفكرة التي أطلقا عليها "الجاذب الغريب" *strange attractor* عبارة ذات إحياء نفسي، كما أحس بذلك رويل فيما بعد. كان وقعها المتميز في دراسة الهولوية لدرجة أنه مع تأكيد قد تصارعا تحت السطح في أدب على من له شرف ابتداء المصطلح.

يعيش الجاذب العجيب في فضاء الطور، واحد من أقوى الاختراعات للعلم الحديث. ففضاء الطور يعطى وسيلة لتحويل الأرقام إلى رسومات، كل نقطة فيها تحمل معلومات عن النظام المتحرك، أجزاء ميكانيكية أو سائل متدفق، ويعطى وسيلة ميسرة لوضع خريطة لكافة الاحتمالات. وقد تعامل الفيزيائيون بالفعل مع نوعين أبسط من الجاذبات: النقاط الثابتة، والدورات المحدودة، يمثلان النظام الذي يؤول إلى حالة الثبات، والنظام الذي يتكرر على الدوام^٧.

في فضاء الطور تمثل كافة المعلومات عن حالة نظام ديناميكي عند لحظة معينة في نقطة واحدة. هذه النقطة هي النظام الديناميكي في هذه اللحظة. عند اللحظة التالية تكون نقطة أخرى، منحرفة عن الأولى بقدر ضئيل. فيمكن بذلك رسم تاريخ النظام عن طريق مسار تلك النقاط مع تغير الزمن.

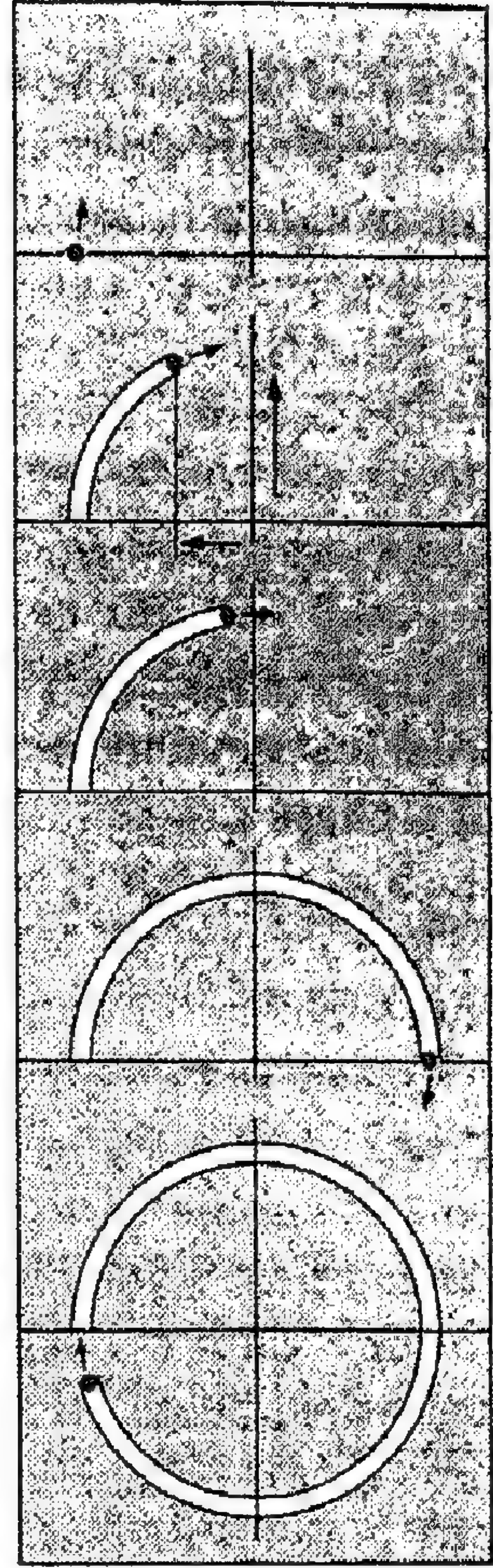


السرعة صفر عندما يبدأ
البندول اهتزازة. الموضع
مقاس من نقطة المنتصف
يأخذ قيمة سالبة، أقصى
ارتفاع جهة اليسار.

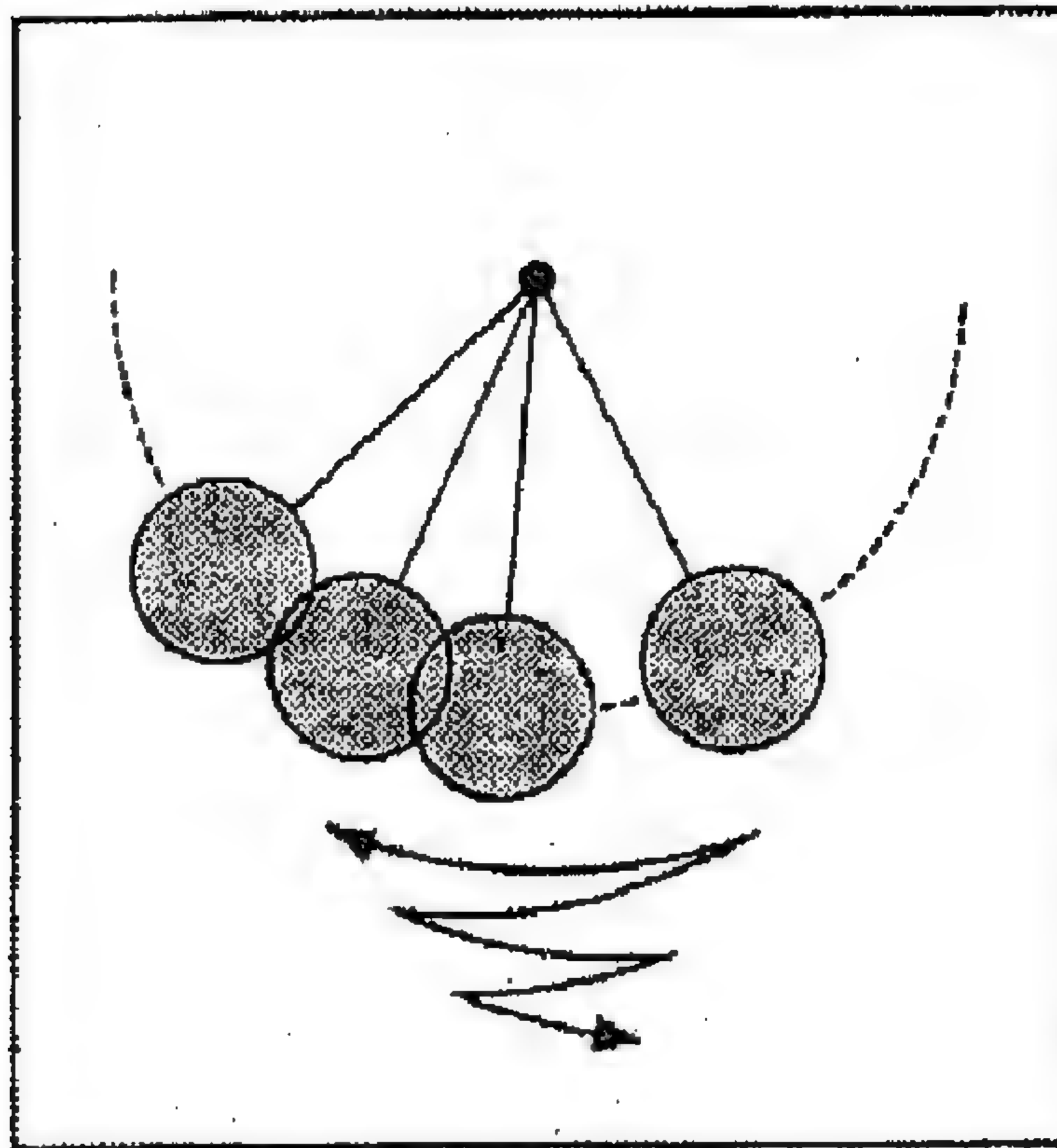
الرقمان يمثلان بعدى نقطة
على فضاء الطور.

تصل السرعة أقصى قيمة
لها عندما يعبر الثقل نقطة
المنتصف، الموضع صفر.

تهبط السرعة مرة أخرى إلى
الصفر عند وصول الثقل
أقصى ارتفاع جهة اليمين، ثم
تكون السرعة سالبة، لكونها
في الاتجاه المضاد، ثم يكمل
الشكل فيكون دائرة كاملة.



طريقة أخرى لرؤية البندول: نقطة على فضاء الطور (يمين) تحتوى على بيانات عن
حالة النظام عند أية لحظة (يسار). للبندول البسيط لا نحتاج إلا لرقمين، أحدهما يعبر
عن الموضع والآخر عن السرعة.

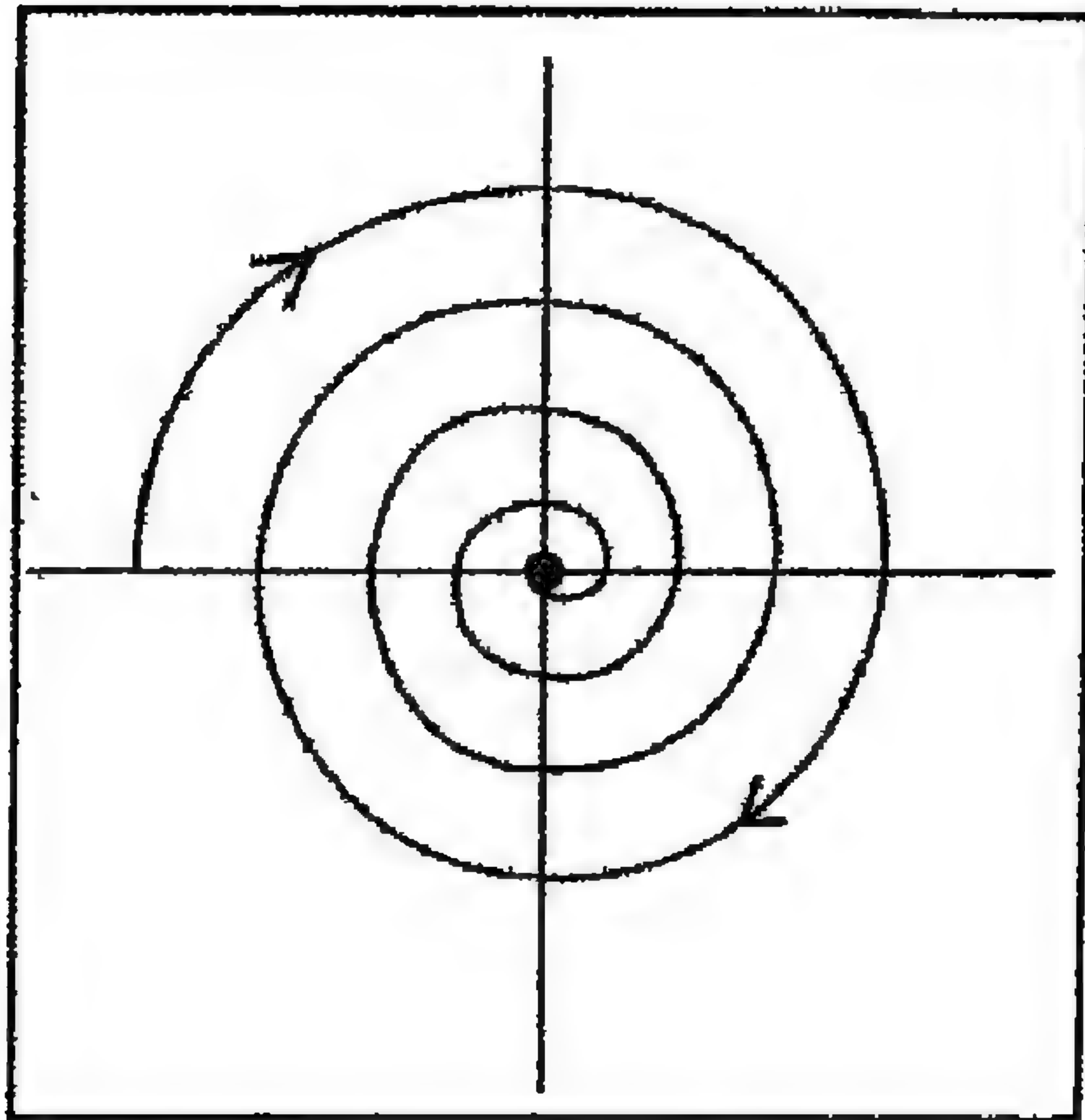


النقاط ترسم مساراً يقدم وسيلة لتصوّر التصرف
الدائم على المدى الطويل للنظام الديناميكي، المنحنى
المغلق المتكرر يمثل نظاماً في حركة ترددية منتظمة.

إذا كان النظام مستقرًا، كبندول الساعة الذى
نعرفه، فإن أى اضطراب طفيف فى النظام سرعان
ما يزول ليعود للحركة المنتظمة مرة أخرى. فى
فضاء الطور تظهر الاضطرابات كاهتزازات فوق
المسار الأصلي، والذي يعتبر الجاذب للنظام.

كيف يمكن تجميع معلومات عن نظام ما في نقطة واحدة؟ في حالة نظام ذي متغيرين فقط، الإجابة سهلة. إنها مباشرة من الهندسة الكارتيزية التي تدرس في المرحلة قبل الجامعية، أحد المتغيرين يمثل على المحور الأفقي، والثاني على المحور الرأسي. لو كان النظام بندولا مهتزاً دون احتكاك، فإن أحد المحورين سيمثل الموضع، والثاني السرعة، وهما يتغيران باستمرار، فيرسمان منحنياً مغلقاً يكرر نفسه على الدوام. وبالنسبة للنظام الأعلى طاقة، حيث تكون الذبذبة أسرع، يرسم النظام منحنى مشابهاً، ولكنه أكبر.

بقليل من الواقعية، على صورة إضافة شيء من الاحتكاك، تتغير الصورة. لسنا محتاجين لمعادلات لنعلم مصير النظام في هذه الحالة، فهو لا بد سينتهي إلى نقطة واحدة يسكن عندها، الموضع صفر، والسرعة صفر. هذه النقطة المتوسطة "تجذب" المسار إليها، فبدلاً من أن يدور ملتفاً على نفسه، يتلوى إلى أن يستقر إلى تلك النقطة. فالاحتكاك يشتت طاقة النظام، ويتمثل ذلك على فضاء الطور كجذب تجاه النقطة المركزية، من المناطق البعيدة الممثلة للطاقة العالية إلى القريبة منها التي تمثل الطاقة الأقل.



شكل ٣-٥ قد يكون الجاذب نقطة، فبالنسبة لبندول يفقد طاقته باستمرار بسبب الاحتكاك، ترسم كل المسارات لولبا يتجه لنقطة واحدة، تمثل الحالة الثابتة، وهي هنا نقطة السكون (الموضع صفر السرعة صفر).

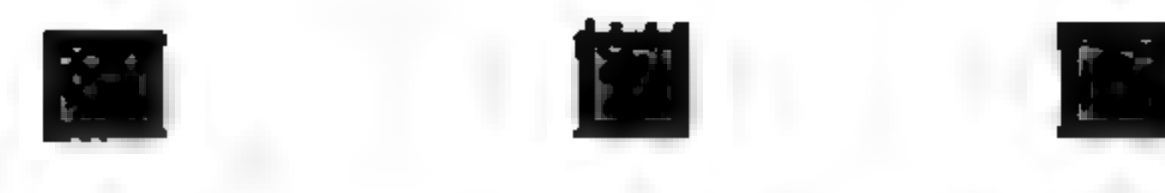
ومن مزايا التفكير في حالات النظام كنقاط في فضاء هو تيسير تصوير التغير. فالنظام الذي تتغير عوامله باستمرار يصبح أشبه بذبذبة طائفة في حجرة، فإذا كانت بعض

الاحتمالات غير متوقعة بالمرّة، فإن العلماء يعتبرون ذلك حدوداً للنظام، وكأن جزءاً من الغرفة محرم على الذبذبة ارتياده. وإذا كان النظام يتذبذب بحيث يمر بنفس النقطة في كل دورة، فإن الذبذبة سوف تطير في منحنى مغلق، زائفة نفس الموقع عليه مرّات ومرّات. وحين ينظر العالم إلى منحنى فضاء الطور فإنه يسترجع على الفور النظام نفسه؛ هذا المنحنى المغلق يقابل هذه الحركة الترددية، هذا الالتواء يمثل ذلك التغير، هذه المنطقة الفارغة تمثل الاحتمالات المستحيلة.

حتى على مستوى بعيدٍ فقط، فإن لقضاء الطور مفاجآت لا تنتهي، ويمكن للحاسوب أن يظهرها، محوّل المعادلات إلى مسارات متحركة ملونة تثير البهجة في النفوس.

ولكن البعدين لا يفيان بالحاجة العملية للدراسة، فالنظم لها عادة أكثر من متغيرين، ويعنى هذا الحاجة للمزيد من الأبعاد. فكل عنصر إضافي يمكنه أن يتغير على استقلال في النظام يعنى درجة إضافية للحرية، تحتاج إلى بعد إضافي لتمثيلها في فضاء الطور، حتى يمكن لكل نقطة فيه أن تمثل النظام تمثيلاً تاماً. كانت المعادلات التي درسها ماي بسيطة، ذات بعد واحد، يكفي رقم واحد لتمثيل حالاتها، قد يعبر عن درجة الحرارة أو عن التعداد، وهذا الرقم يحدد النقطة على خط فضاء الطور. وكانت معادلات لورنز عن تيارات الحمل ذات ثلاثة متغيرات، ليس لأن السائل يتحرك في فضاء ثلاثي الأبعاد، ولكن لأن المعادلات تحتاج لثلاثة أرقام لتحديد حالة النظام في لحظة ما.

أما الفراغ الذي يكون له أربعة أو خمسة أبعاد أو أكثر، فإن العقل البشري يعجز عن تصوره. ولكن النظم تحتوى بالفعل على العديد من المتغيرات المستقلة. ولو كان النظام له عدد غير محدود من المتغيرات، فإنه محتاج لعدد لا نهائي من الأبعاد. إنه نظام فظيع بشع غير خاضع لسيطرة، وهذه في الواقع فكرة لاندو عن الاضطراب.



للفيزيائيين كل الحق في كراهية نموذج لا يمثل الحقيقة. واستخدام المعادلات اللاخطية في معادلات حركة السوائل يجعل أقوى حاسوب غير قادر على متابعة الاضطراب في قدم مكعبة من سائل لأكثر من عدة ثوان. في مثل هذه الحالة يحق للفيزيائي أن يتصور أن عنصراً ما من الحقيقة لم يكشف عنه بعد. وكمثل الكثيرين ممن بدعوا في دراسة الهولوية، كان رويل يحس بأن الاضطراب في تدفق السوائل لا بد أنه يخضع لقوانين لم يتم الكشف عنها بعد. وفي ذهنه كان يرى أن تشتت الطاقة في تدفق مضطرب يجب أن يؤدي إلى نوع من الانكماش في فضاء الطور نحو جاذب معين. بالتأكيد هذا الجاذب ليس نقطة، لأن التدفق لا يعرف السكون. إن الطاقة تصب في النظام كما تشتت منه. أي نوع من الجاذبات يمكن أن يكون؟ طبقاً للعقيدة السائدة لا يوجد سوى نوع آخر، الجاذب الدوري الذي يمثل دورة مستقرة، مسار منجذب إلى كافة المسارات الأخرى القريبة منه. لو أن بندولا يتأرجح ويستمد طاقة تعوض تلك التي تشتت نتيجة الاحتكاك، فإن المسار في فضاء الطور سوف يكون منحنى مغلقاً كما سبق شرحه. لا يهم من أي موضع يبدأ، فهو سوف يستقر على

مسار معين. أحقا ذلك؟ إن هناك بعض الأوضاع المبدئية، تلك التي لها طاقة غاية في الضالة، سوف تجعل البندول يؤول للسكون. النظام على ذلك له جاذبان، الأول منحني مغلق، والثاني نقطة.

في المدى القصير تُعتبر كل نقطة في فضاء الطور ممثلة لحالة في النظام الديناميكي. أما على المدى الطويل، فإن الجاذب هو الذي يمثل الحالة النهائية وصور التحرك الأخرى هي وقتية. وطبقا للتعريف، للجاذبات خاصية هامة هي الاستقرار. وفي الواقع العملي، حيث تتعرض النظم للشد والجذب من المؤثرات الخارجية، فإن النظام يميل إلى الرجوع للجاذب. قد تدفع خبطة عارضة بالنظام إلى الابتعاد، ولكنها حالة وقتية لن تلبث أن تزول. حتى لو قفزت قطة في داخل الساعة، فإن بندولها لن يتحول إلى نظام تكون الدقيقة فيه خمس وستون ثانية. أما اضطراب السوائل فأمر آخر. إنه لا يستقر على الإطلاق على اهتزاز ذي تردد معين مستبعداً الاهتزازات الأخرى، بل إن كل أنواع الاهتزازات مسموح بها في نفس الوقت بصورة مستقرة. هل يمكن لشئ كهذا أن يتمخض عن نظام من معادلات بسيطة محددة؟

تساعل رويل وتاكنز عن إمكانية وجود جاذب من نوع آخر تكون له مجموعة الخصائص المناسبة: مستقر ليمثل الحالة النهائية لنظام ديناميكي، وفي نفس الوقت لا يستقر على حالة ثبات، أي لادوري، فهو لا يكرر نفسه على الإطلاق. من الوجهة الهندسية كان السؤال لغزا: لكي يمثل كافة الاهتزازات، فإن المسار يكون عبارة عن خط لانهائي الطول، ولكن محصور في مساحة محدودة. لم تكن الإجابة قد وضع لها المصطلح المناسب بعد، إن الجاذب هو في الواقع شكل فراكتلي.

عن طريق المنطق الرياضي، انتهى رويل وتاكنز إلى أن شيئا كهذا يجب أن يكون موجودا، إنهم لم يروه بعد، ولم يقوموا برسمه، ولكن البرهان كان كافيا. ويتذكر رويل كيف قُوبِلَت هذه الأفكار في مؤتمر علمي في وارسو: "كان رد الفعل يتسم بالبرود، بل لقد اعتبر الكثيرون من الفيزيائيين أن فكرة طيف متصل مصحوب بعدد محدود من درجات الحرية نوعا من الهرطقة." ولكن الفيزيائيين، عدد قليل منهم في الواقع، قد فهموا مضامين بحث عام ١٩٧١، وبدؤوا العمل على ضوئه.

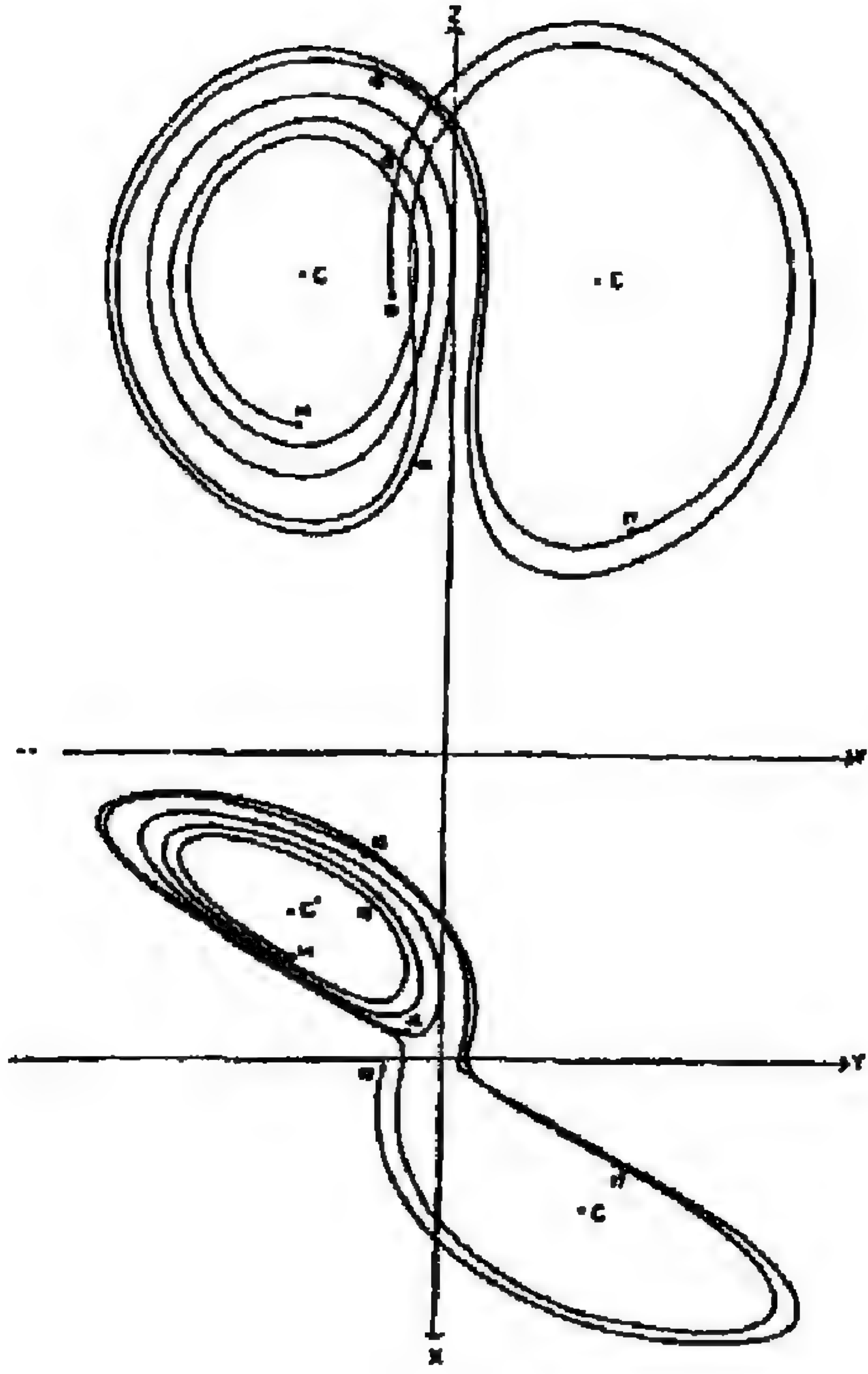


في عام ١٩٧١، كانت الكتابات العلمية تحتوى في الواقع رسماً تخطيطياً لمثل هذا الكائن الخرافي الذي يريد رويل وتاكنز بث الحياة فيه، كان إدوارد لورنز قد ألحقه

ببحثه لعام ١٩٦٣ عن (العشوائية التحديدية)^{vii}، صورة تحتوى فقط على منحنين إلى اليمين، واحد داخل الآخر، وخمس اليسار. لرسم هذه المنحنيات السبعة تطلب الأمر القيام بخمسة آلاف عملية حساب متتالية على الحاسوب. إن نقطة تسير على هذا المنحنى فى فضاء الطور تمثل الدوران الهىولى البطيء لتيارات الحمل التى مثلها لورنز بمعادلاته الثلاث. ولما كان هذا النظام له ثلاثة متغيرات، فإن فضاء الطور يكون ثلاثى الأبعاد. ورغم أن لورنز لم يرسم إلا جزءا منه، إلا أنه رأى أكثر مما رسم، نوع من لولب مزدوج، أشبه بجناحى فراشة، ملتفان بتعقيد غاية فى الروعة. وحين تدفع الحرارة السائل ليتحرك فى اتجاه معين، يستقر المسار على الجناح الأيمن مثلا، وحينما ينعكس ليدور فى الاتجاه الآخر، يكون المسار على الجناح الأيسر.

كان الجاذب مستقرا، قليل الأبعاد، غير دوري. إنه لا يتقاطع مع نفسه أبدا، لأنه لو فعل، وعاد النظام لنقطة سابقة، فإنه سوف يدور حول المنحنى الذى قُفل، وستكون الحركة دورية. إن هذا لا يحدث أبداً، وفى هذا يكمن سر جمال الجاذب. كل هذه اللوالب تمتد إلى عمق لانهائى، لا يتصل بعضها ببعض أبدا، ولا تتقاطع أبدا، ولكنها فى نفس الوقت محتواة فى حيز محدود على شكل الصندوق. كيف لعدد لانهائى من المسارات أن تحتوى فى حيز محدود؟

قبل أن تغمر أشكال ماندلبروت السوق العلمى، كانت تفاصيل مثل هذا الشكل أصعب من أن تُتصور، وأدرك لورنز "تعارضاً ظاهرياً" فى وصفه المبدئى، وقد كتب: "كان من الصعب التوفيق بين تداخل سطحين، كل يحتوى على لولب من اللولبين، مع حقيقة استحالة تقاطع المسارات" ولكنه رأى أن الإجابة أكبر من أن تظهر من خلال العدد المحدود من الحسابات التى قام بها. لقد أدرك أن النقاط التى يبدو فيها تقاطع للمسارات، فإنها تكون فى الواقع على مستويات مختلفة فى الفراغ، ومن ثم فهى غير متقاطعة. ولذلك فإنه لا عجب ألا يعبأ علماء الطبيعة الجوية ببحت لورنز، ولا أن يصاب رويل بعد عقد من الزمان بالدهشة والإعجاب حين علم به. وقد ذهب لزيارته بعد ذلك، وكانت زيارة ودية أسف رويل أنها لم تكن أطول.



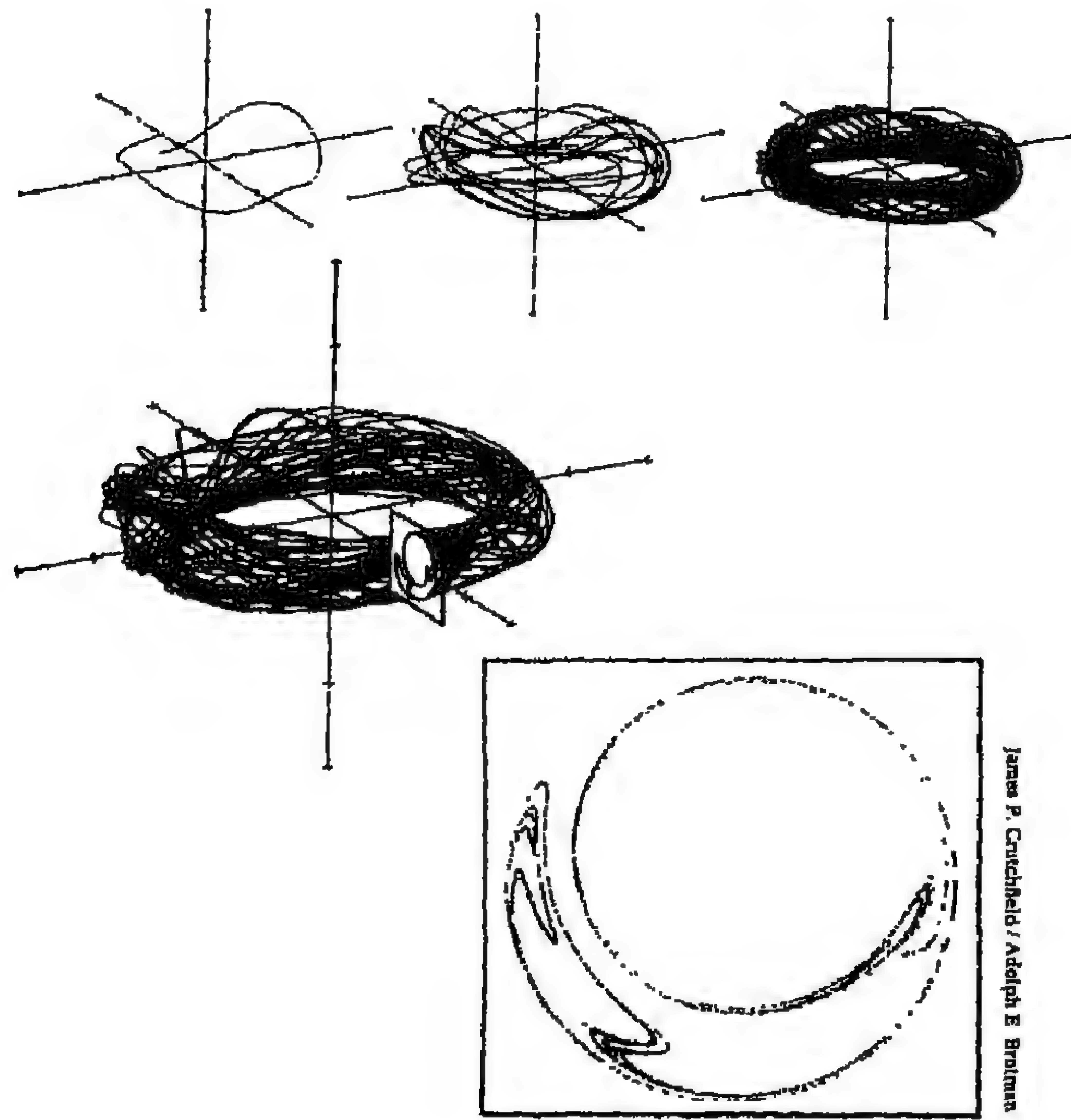
شكل ٤-٥ أول جاذب غريب: فى عام ١٩٦٣ تمكّن إيوارد لورنز من إجراء حسابات لبعض الطيّات الأولى لنظامه المكوّن من ثلاثة معادلات بسيطة. ولكنه كان يحس بأن هذين الجناحين اللولبيين يجب أن يكونا هيكلًا غير عادي. [ملحوظتان من المترجم: ١- الجاذب شكل فراغى، أى ذو ثلاثة أبعاد، ولذا فإن التقاطعات البادية فى الشكل غير حقيقية، فخطوط الجاذب لا تتقاطع أبدا. ٢- لأن الشكل فراغى (ثلاثى الأبعاد)، فإنه مبين فى الشكل بطريقة الإسقاط المعروفة فى الرسم الهندسى للأشكال الفراغية. يسمى الشكل العلوى المسقط الرأسى، والسفلى بالمسقط الأفقى، وهو نفس الشكل المعبر عن حالة الهولوية الذى ورد فى الفصل الأول شكل ١-٤، وفى الفصل الثانى، شكل ٢ - ١، الحالة الرابعة.]

اتخذت الجهود لتتبع التلميحات التى أشار إليها بحث رويل وتاكتر مسارين. الأول كان صراعاً نظرياً لتصوّر الجاذب، هل جاذب لورنز يُعتبر نمطياً؟ ما هى الأشكال الأخرى الممكنة؟ والثانى كان تجريبياً بهدف إثبات أو نفي القفزة غير المدعّمة رياضياً الهادفة إلى إمكانية تطبيق الجاذب على النظم الهولوية فى الطبيعة.

فى اليابان، قادت الأبحاث فى الدوائر الكهربائية - التى هى أسرع بمراحل من النظم الميكانيكية - بـ يوشيسوك أيدا Yoshisuke Ueda إلى وضع عدد من الجاذبات العجيبة. (وقد قابل نفس التحية الباردة التى قوبل بها رويل). وفى ألمانيا، بدأ أوتو روسلر Otto Rössler الطبيب فى رؤية الجاذبات العجيبة كأشكال فلسفية، مخلفاً الجانب الرياضى وراءه. وقد ارتبط اسمه بجاذب بسيط على شكل شريط مطوي، درسه بسبب بساطته، ولكنه كان يستطيع تصوّر ما هو أكثر أبعاداً؛ "إصبع من السجق داخل آخر داخل آخر، أخرجه، اطوه، اضغطه، ثم أعد له مكانه." إن الطي والضغط هما فى الواقع مفتاح تكوين الجاذبات العجيبة، وربما كانا المفتاح لديناميكا النظم الواقعية التى تسببت فى وجودها. وقد شعر بأن هذه الأشكال تتضمن مبدأً للتنظيم الذاتى فى العالم الواقعى.

ليس عمل صور للجاذبات العجيبة بالأمر الهين على الذهن، فالمسارات تتداخل في تعقيدات لانهائية بحسب عدد الأبعاد، منتجة مناطق مظلمة وهياكل داخلية لا يمكن أن تُرى من الخارج. ولتصوير شكل ذي ثلاثة أبعاد على ورقة مسطحة استخدم العلماء في البداية فكرة الإسقاط المعروفة لدى المهندسين. ولكن مع زيادة الأبعاد فإن الإسقاط يصبح بلا جدوى، فلجأ العلماء إلى فكرة "خريطة الإعادة" ^{viii} "return map" أو خريطة "بوانكاريه" "Poincaré map" العبقرية، والتي تقوم فكرتها على أخذ شريحة من قلب الجاذب المتشابك، بالضبط كما يأخذ الجراح عينة من أحد الأنسجة.

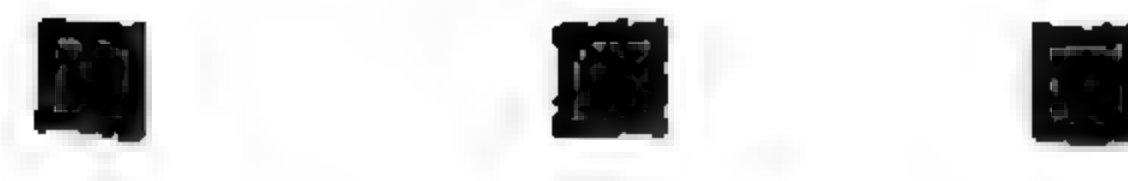
تزيل خريطة بوانكاريه بعداً من الجاذب، وتحيل الخط المتصل إلى نقاط منفصلة. وفي تحويل جاذب إلى خريطة بوانكاريه المقابلة له، يعتمد الباحث على قدرته في التقاط أكثر النقاط أهمية، وهو في سبيله لذلك لا يفتأ يتصور الجاذب حياً مليئاً بالحركة في ذهنه، بينما مساراته تتحرك في كافة الاتجاهات أمام عينيه على شاشة الحاسوب.



شكل ٥-٥ إظهار هيكل الجاذب: الجاذب الغريب المبين بأعلى الصورة، بداية مسار واحد، ثم عشرة فمئة، تبين التصرف الهولي لبندول يدفع على فترات منتظمة. عندما يصل عدد المسارات إلى عدة آلاف، يصبح هيكل الجاذب مستحيل التصور.

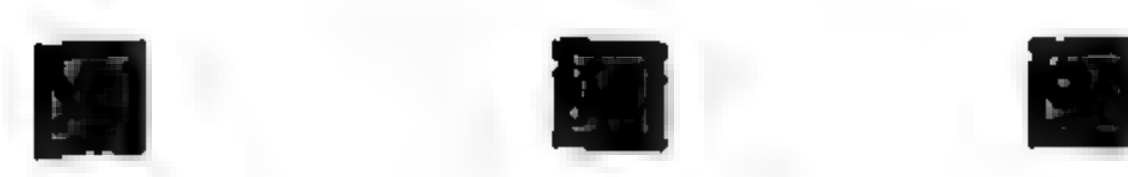
لبيان التركيب الداخلي، يمكن للحاسوب أن يصنع شريحة مقطعية في منطقة منه، تسمى مقطع بوانكاريه Poincare section. هذا الأسلوب يحيل الشكل ذا الثلاثة أبعاد إلى شكل ذي بعدين، وفي كل مرة يعبر الجاذب الشريحة، فإن نقطة تُوقَّع على الرسم. وبالتدريج يتضح الشكل أكثر فأكثر. المثال المعطى له أكثر من ثمانية آلاف نقطة، كل نقطة تمثل مساراً كاملاً حول الجاذب. النتيجة هي أخذ عينات على فترات منتظمة، فإذا فقدت بعض المعلومات، فإن غيرها تعوض هذا الفقد.

يشبه تكنيك خريطة بوانكاريه أخذ عينات من النظام بدلاً من تصويره كمتصل. ويكون لدى الباحث بعض المرونة في اختيار أماكن أخذ العينة، بتحديد أكثر النقاط أهمية وثراء في معلومات النظام. فقد تكون بالنسبة للبندول المتأرجح هي النقطة السفلى، حيث تكون السرعة في أقصى قيمتها. أو قد يختار الباحث فترات متساوية ويرصد نقاط النظام عندها. وعلى أي من الطريقتين، فإن الصورة الناتجة سوف تعبر عن الهيكل الفراكتلي الذي تصوره إدوارد لورنز.



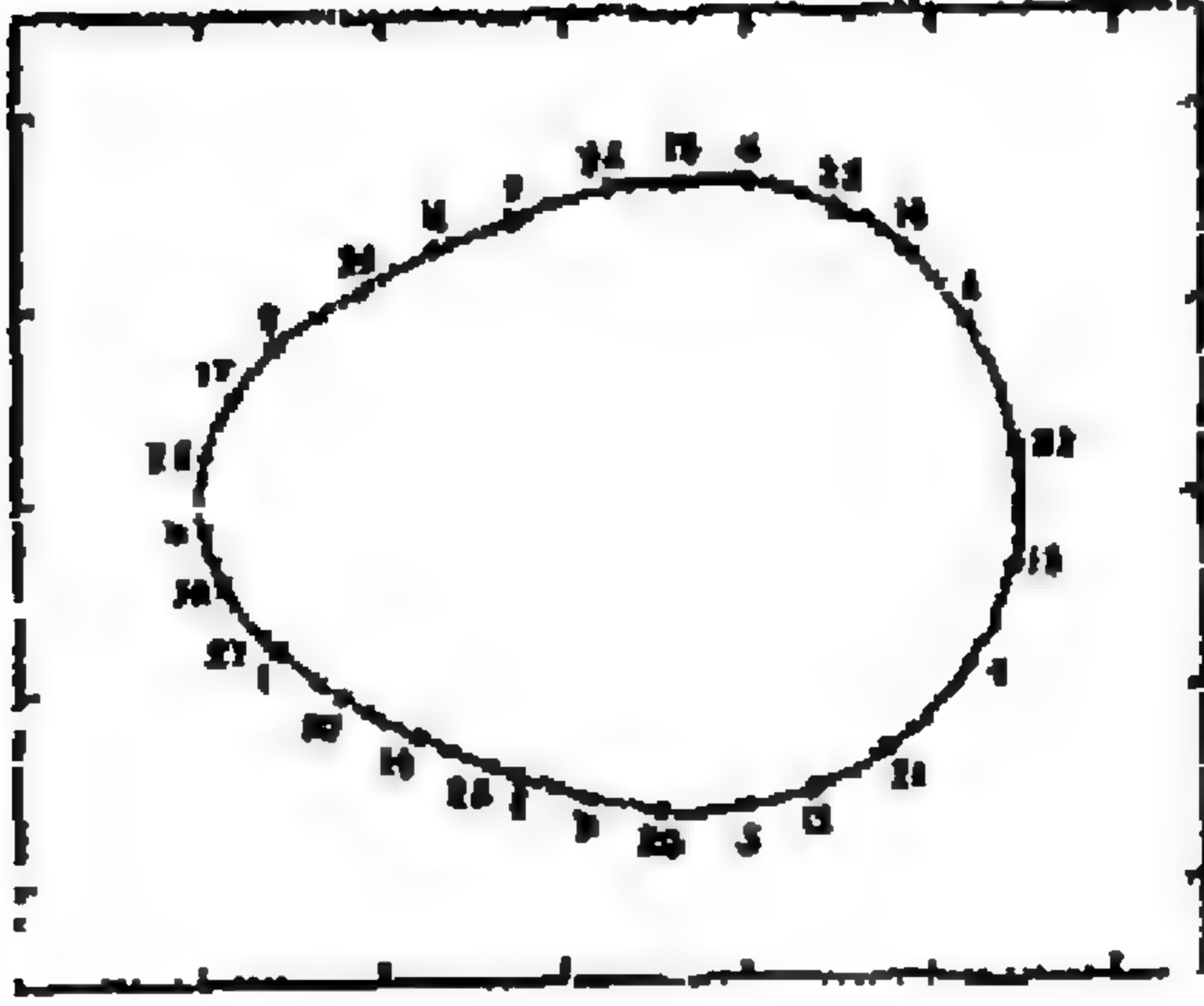
حينما جاء دافيد رويل إلى معمل جولب وسويني، عام ١٩٧٤، وجد الفيزيائيون الثلاثة أنفسهم في موقع حساس بين النظرية والتجربة. قطعة من الرياضيات، راسخة فلسفياً، ولكنها من الوجهة الفنية غير مؤكدة. أسطوانة من سائل مضطرب، ليس فيه ما يغري بالنظر، ولكنه يبين تماماً أنه غير متفق مع النظرية القديمة. يتحادث الرجال، ثم ينصرف كل لشأنه، لم يروا جاذباً عجيباً، ولم يجرؤوا قياسات كثيرة عن حالة بدء الاضطراب، ولكنهم يعلمون أن لاندو على خطأ، ويتوقعون أن يكون رويل على صواب.

وكنصر من عناصر العالم كشف عنه الحاسوب، بدأ الجاذب العجيب كمجرد احتمال، مشيراً لمكان فشل الكثيرون من أصحاب الخيال القوي في القرن العشرين أن يتجهوا إليه. ثم سرعان-حينما رأى العلماء ما أظهره الحاسوب- بدأ وكأته وجه كانوا يرونه في كل مكان، في موسيقى التدفق المضطرب، وفي السحاب المنتشر كالغلالة عبر السماء. إن الطبيعة مقيدة، فالاضطراب يبدو وكأنه مرتبط بأشكال ذات مضامين مشتركة.

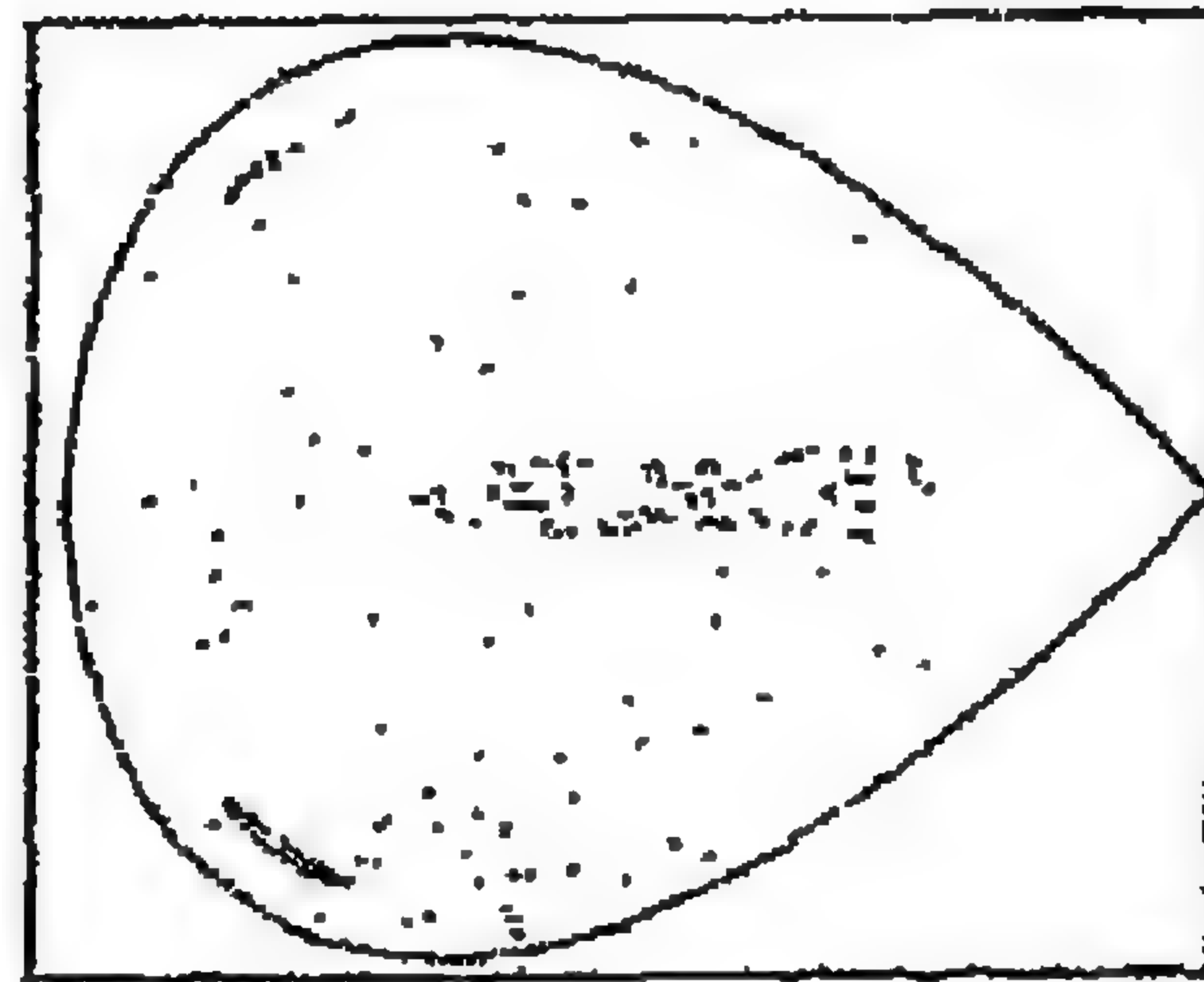
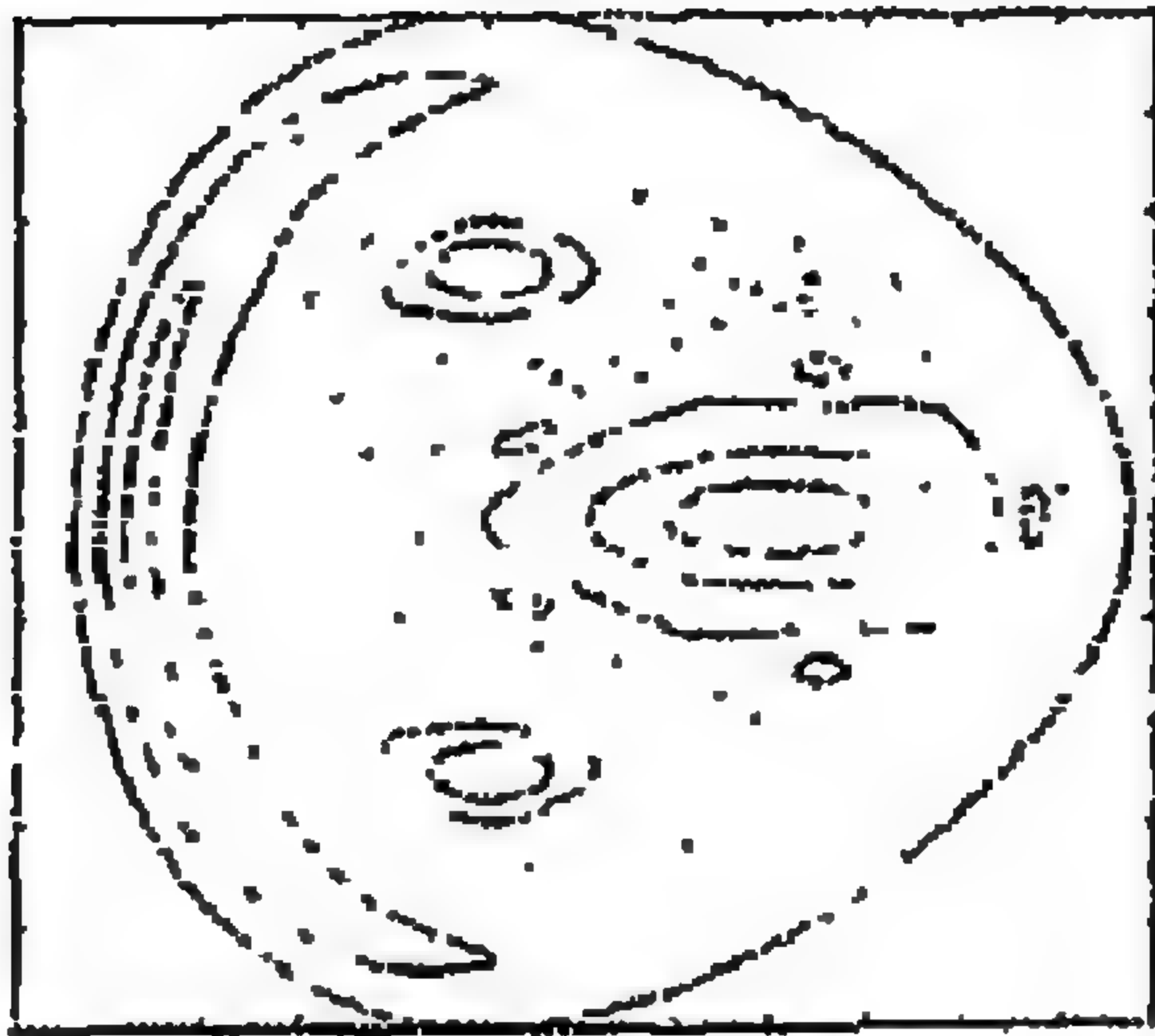
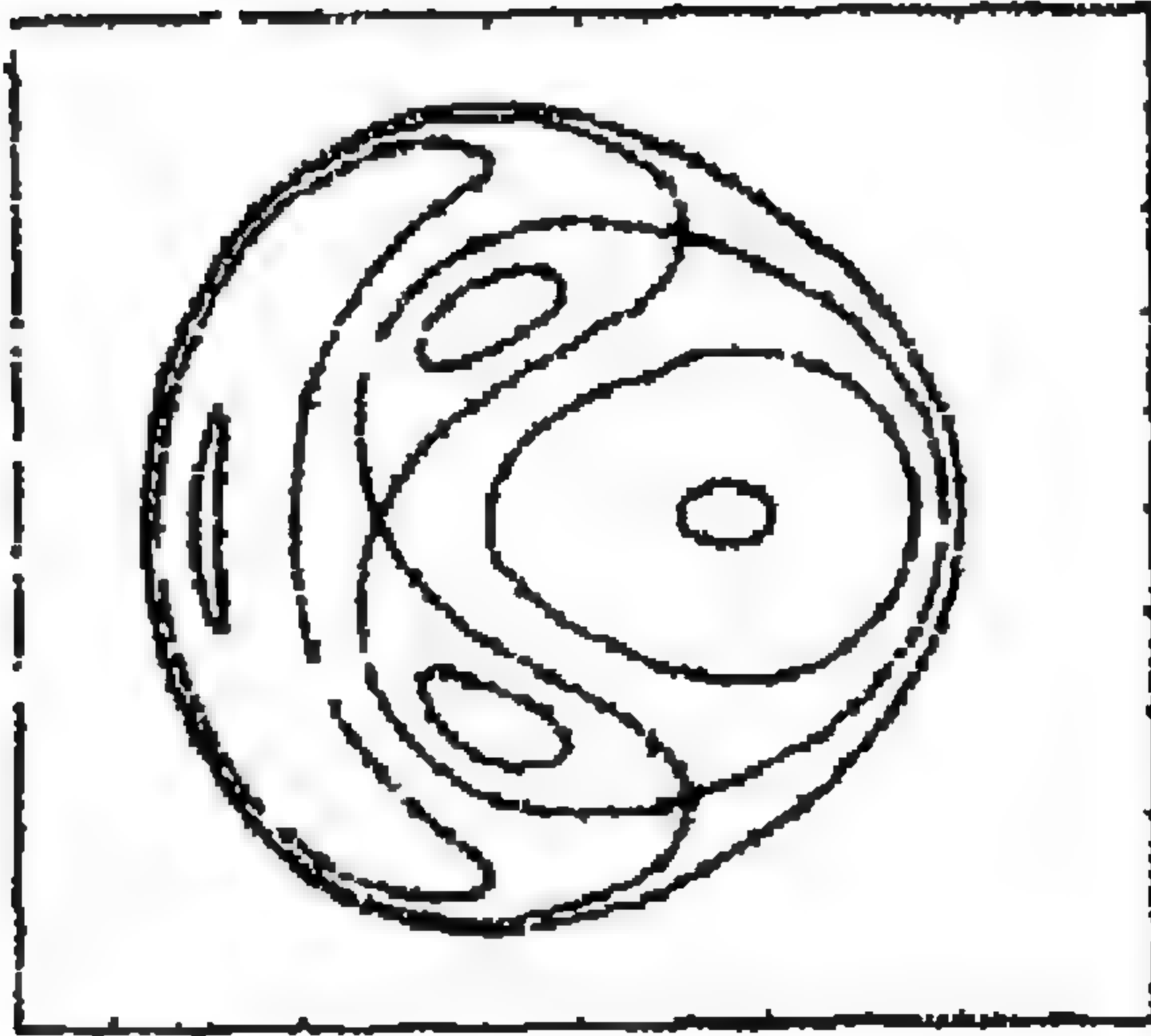


وقد جاء أشهر جاذب عجيب، وذلك بسبب أنه كان الأبسط، من شخص لا علاقة له لا بالاضطرابات ولا بديناميكا الموائع، بل كان فلكياً يدعى ميشيل هينون Michel Hénon من مرصد نيس. ويرجع الفضل للنظم الفلكية في إعطاء الدفعة الأولى لدراسة النظم

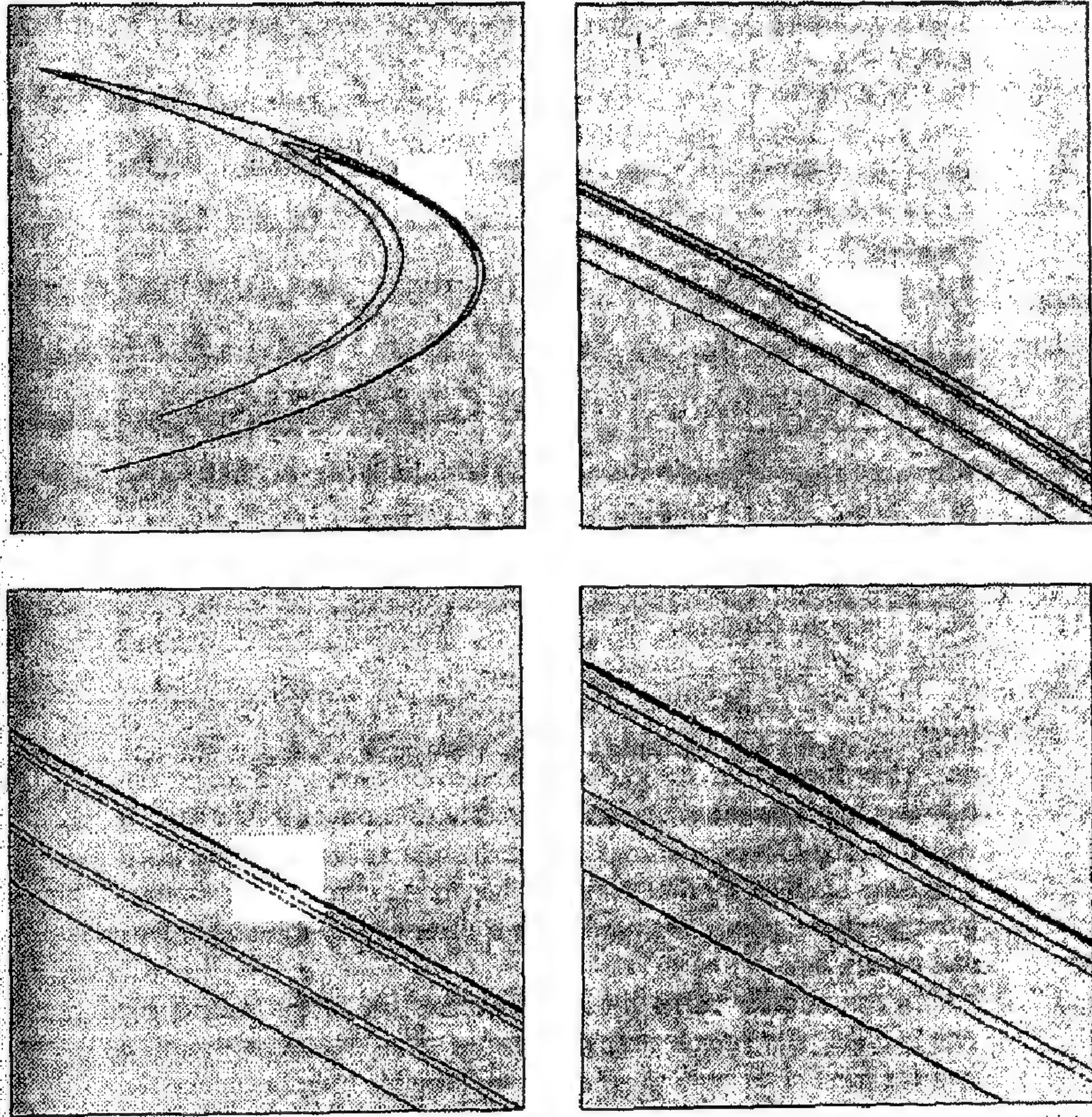
الديناميكية، فحركات الكواكب المنضبطة كالساعة هي التي أعطت نيوطن شهرته، ولابلاس إلهاماته. ولكن ميكانيكا السماوات تختلف عن مثيلتها في الأرض من وجهة نظر جوهريّة. فالنظم الأرضية تفقد طاقتها بسبب الاحتكاك، فهي نظم "مشتتة للطاقة"، بينما لا تكون النظم الفلكية كذلك، إنها نظم "محافضة على الطاقة". في الواقع، على المستوى الضئيل فإن هذه النظم تعاني أيضاً من التباطؤ، بسبب إشعاع الطاقة والتجاذب فيما بينها. ولكن الاعتبارات العملية تقتضي أن يتجاهل الفلكيون هذا القدر من التشتت، وعندئذ لن يعاني فضاء الطور انكماشاً أو طياً على الوجه المطلوب لإنتاج طبقات (فراكتالية). لا يمكن للجاذب العجيب أن ينشأ^٩، فهل يمكن ذلك للهيولية؟



شكل ٥-٦ مسارات حول مركز مجرى، لفهم مسارات الكواكب خلال المجرات، حسب ميشيل هينون تقاطعات مسار ما مع مستوى معين. يعتمد النمط النهائي على الطاقة الكلية للنظام. النقاط المتعلقة بنظام مستقر ترسم بالتدرّج منحنى متصلاً (يسار)، بينما تعطى مستويات أخرى للطاقة مزيّجا من الاتزان والهيولية، ممثلة بمناطق من نقاط مبعثرة.



لقد حقق الكثيرون من الفلكيين شهرة ومستقبلا باهرا دون أن يشغلوا بالهم بالنظم الديناميكية بالمرّة، ولكن هينون كان مختلفا. لقد ولد في باريس عام ١٩٣١، أصغر قليلا من لورنز ولكنه كان على شاكلته، عالما له شغف لا يعرف الشبّع بالرياضيات. كان يحب منها المسائل الصغيرة المحددة، والتي تقتضى التعامل مع الفيزياء، وليس على شاكلة ما يفعله الناس هذه الأيام على حد قوله. وحين هبط الحاسوب لمستوى الهواة، اقتنى واحدا من الطراز الذى يمكن اقتناؤه منزليا. على أنه قبل ذلك بوقت طويل، كان قد انشغل بمسألة محيرة بصورة خاصة فى الديناميكا، بالتجمع النجمي، ملايين النجوم تتجمع فى منطقة ما، وهى من أهم ما يخلب اللب عند النظر للسماء ليلا. إن مثل هذا التجمع كثيف للغاية بالنجوم. وقد حير العلماء طويلا كيف تظل باقية مع بعضها البعض، وكيف يتطور الموقف بينها مع الزمن.



شكل ٥-٧ جاذب هينون: إن المزج البسيط بين الطى والمط يعطى جاذبا سهل الحساب ولكن لا يزال صعب الفهم على الرياضيين. بينما تظهر آلاف، ثم ملايين من

النقاط، تتضح التفاصيل أكثر. فما يبدو مستقيماً بسيطاً يتضح عند التكبير أنه مزدوج، ثم مزدوجاً مضاعفاً، ومع ذلك فإن نقطتين متتابعتين سوف يظلان متجاورتين أمر يتباعدان على مر الزمن فأمر من غير الممكن التنبؤ به.

من وجهة النظر الديناميكية، يمثل التجمع النجمي مسألة تحتوى على أجسام متعددة. وكان نيوتن قد حل المسألة المحتوية على جسمين، كالأرض والقمر، فكل جسم منهما يدور فى مسار إهليلجى حول مركز ثقل المجموعة. ولكن حين يضاف جسم ثالث للمجموعة، يتغير كل شيء. إذ تصبح المسألة مستعصية على الحل تماماً. يمكن حساب المسار رقمياً إلى مدى معين، وباستخدام أقوى الحواسيب يمكن تتبعها لمدة ما قبل أن يفقد الحساب الدقيق أثره. أما حل المسألة رياضياً، بمعنى الوصول إلى حل شامل للمسألة، فأمر مستحيل. هل النظام الشمسى مستقر؟ إنه بالقطع يبدو كذلك، على المدى القصير، ولكن حتى اليوم لا يعلم أحد يقينا أن مدار كوكب ما لن يصبح منحرفاً بصورة مطردة إلى أن يفقد للأبد.

إن نظاماً كالتجمع النجمي من التعقيد بحيث لا يمكن معاملته معاملة مباشرة كمسألة متعددة الأجسام. ولكن جانبه الديناميكي يمكن أن يدرس بمساعدة بعض التجاوزات. من المعقول مثلاً أن نعتبر الأجسام تشق طريقها عبر مجال تجاذبي ذي مركز مشترك. وأنه يحدث كثيراً أن يقترب نجمان من بعضهما البعض بدرجة تسمح بمعاملتهما كنظام مستقل. وقد أدرك العلماء أن التجمع النجمي لا يمكن أن يكون مستقراً. فالنجوم تميل إلى أن تتجمع فى أزواج، وحين ينضم للازدواج نجم ثالث، فإن نجماً من الثلاثة يتعرض لدفعة قوية تقذف به خارج التجمع النجمي كلية ١٠، وبالتالي تتضام النجوم الباقية قليلاً. حين أخذ هينون هذه المسألة كرسالة للدكتوراه عام ١٩٦٠، وضع افتراضاً اجتهادياً إلى حد ما؛ أن التجمع حين يقل فى حجمه، يحافظ على تماثله الذاتى. وحين أجرى حساباته، توصل إلى نتيجة مذهشة، سوف ينهار قلب التجمع على نفسه، مكتسباً طاقة حركة، ومنتجها إلى حالة لانهائية من الكثافة. كان هذا صعب التصور، والأهم من ذلك أنه غير مؤيد بشواهد التجمعات النجمية التى رصدت إلى الآن. ولكن نظرية هينون، والتي أخذت فيما بعد اسم "الانهيار التجاذبي الحرارى gravothermal collapse"، تملك الزمام بعد حين.

ثم بدأ يعمل على مشكلة أبسط فى موضوع ديناميكا النجوم. فى هذا الوقت، عام ١٩٦٢، وخلال زيارته لجامعة برنستون، أتيح له استخدام الحاسوب، بالضبط كما أتيح للورنز استخدامه فى مسائل الطبيعة الجوية. بدأ هينون يضع نماذج لمسارات النجوم حول مركز مجراتها. وبنوع من التبسيط يمكن تشبيه ذلك بمسار الكواكب حول الشمس، مع اختلاف واحد، لا يكون مصدر الجاذبية المركزية نقطة، بل قرصاً ثلاثى الأبعاد.

وأجرى بعض التبسيطات على المعادلات التفاضلية، عبر عنها بقوله "لكني نحصل على حرية أكبر في الاختبارات، تجاهلنا مؤقتاً الأصل الفلكي للمشكلة". وقد كان يعنى بحرية الاختبارات، وإن لم يصرح بذلك فى حينه، إمكانية التعامل مع الحاسوب، حتى وإن كان بدائياً بمقاييس أجهزتنا اليوم. فجهازه كان ذا ذاكرة سعتها جزء من ألف جزء مما للحاسبات بعد خمس وعشرين سنة، وسرعة أبطأ بكثير عنها. ولكن كما حدث فى تجارب الهيولية التى تمت فيما بعد، وجد هينون أن للتبسيط فوائده. فبتجريد نظامه توصل إلى نتائج قابلة للتطبيق فى نظم أخرى أيضاً، وهى أنظمة أهم أيضاً. على أنه بعد وقت كانت المسارات المجرية لا تزال لعبة نظرية، ولكن ديناميكية مثل هذه النظم كانت تحت دراسة مستفيضة بواسطة المهتمين بمسارات الجسيمات الأولية فى المعجلات فائقة الطاقة، والمهتمين بتكثيف مغناطيسية البلازما لإنتاج الاندماج النووى.

تكون لمسارات النجوم فى المجرات، على مدى زمنى يبلغ حوالى ٢٠٠ مليون عام، ثلاثة أبعاد بدلا من أن تكون شكلا إهليلجيا خالصا. والمسارات ثلاثية الأبعاد أصعب فى التصور الذهني، كما هو الحال حينما يتصور فضاؤها الطوري. ومن ثم فقد استخدم هينون تكتيكا يماثل خريطة بوانكاريه. لقد تخيل صحيفة رأسية واقعة فى جانب من جوانب المجرة، يخرقها كل مسار من المسارات، كما تجتاز الجياد خط النهاية، ثم يسجل نقطة التقاء المسار بالصحيفة، ويراقب هذه النقاط مسارا بعد الآخر.

كان على هينون فى البداية أن يرسم هذه النقاط يدوياً، ولكن بعد حين بدأ كثير من العلماء المطبقين لهذا التكنيك فى رؤيتها على شاشة الحاسوب. وكما تقترب مصابيح إضاءة الشوارع واحدا وراء الآخر، كانت نقاط المسارات التقليدية تظهر كنقطة فى أقصى اليسار السفلى من الصحيفة، ثم فى الدورة التالية تظهر نقطة أعلى اليمين قليلا، ثم أخرى فأخرى، أكثر علوا وانحرافا لليمين، وهكذا. فى البداية يكون الشكل واضحا، ولكن بعد عشر أو عشرين نقطة يظهر منحنى على شكل بيضة، ثم تصنع النقاط الأخرى دوائر حول الشكل، وبعد مئات أو آلاف من الدورات يكون الشكل قد تحدد بصورة قاطعة.

مثل هذه المسارات ليست منتظمة تماماً، حيث إنها لا تكرر نفسها بالضبط أبداً، ولكنها بالتأكيد قابلة للتوقع، فهى بذلك أبعد عن أن تكون هيولية. إلى هذا الحين كان يسجل ما كان مأخوذا كقضية مسلم بها، المسارات دورية. لقد قامت أجيال من الفلكيين برصد وحساب المئات من هذه المسارات على مدى السنين، ولكن اهتمامهم كان منصبا فقط على الدورى منها. ويقول هينون: "أنا أيضا كنت مقتنعا بأن المسارات

يجب أن تكون منتظمة". ولكنه مع مساعده كارل هيلس Carl Heiles استمررا في الحسابات، مزيدين الطاقة تدريجيا في نظامهم التجريدي، وسرعان ما شاهدا شيئا جديدا تماما.

في البداية أخذت البيضة تتلوى إلى شكل أكثر تعقيداً، متقاطعة مع نفسها في أشكال تشبه رقم 9 ومنقسمة إلى منحنيات منفصلة، ولكن مع بقاء كل مسار داخل منحناه. ثم مع الاستمرار في زيادة الطاقة، حدث تغير فجائي. يقول هينون وتلميذه: "هنا كانت المفاجأة." بعض المسارات أصبحت غير مستقرة لدرجة أن النقاط بدت مبعثرة على الورقة. في بعض المواضع كانت المنحنيات لا تزال ترسم، وفي غيرها لا تمثل النقاط أية منحنيات. كانت الصورة درامية للغاية، مظاهر للفوضى الكاملة ممزوجة ببقايا لا تنكرها العين من النظام، تلوح للفلكيين كجزر وسلاسل من جزر. لم يكن أمامهما إلا الاستكشاف وتصوير الاحتمالات. وتأسيساً فقط على تجاربهم الرقمية، وضعوا تخميناً حول الهيكل العميق لمثل هذه الصورة. لقد خمنوا أنه مع المزيد من التكبير ستظهر المزيد والمزيد من الجزر أصغر وأصغر، ربما إلى ما لا نهاية. كان البرهان الرياضي مطلوباً، ولكن الأمر لم يكن هيناً.

وانصرف هينون إلى مسائل أخرى، ولكن بعد أربعة عشر عاماً، حين سمع عن الجاذب العجيب لدافيد رويل وإدوارد لورنز، كان مستعداً لأن ينصت. فبحلول ١٩٧٦ كان قد انتقل إلى مرصد نيس، حيث سمع محاضرة عن جاذب لورنز. كان الفيزيائي المحاضر يحاول أساليب مختلفة لإظهار التركيب الدقيق للجاذب، ولكن دون نجاح كبير. ورغم أن النظم المشتتة للطاقة ليست تخصص هينون (أحياناً يبدى الفلكيون خوفاً من هذه النظم، فهي غير مهندمة)، إلا أن فكرة وافته.

مرة أخرى، قرر أن يلقي جانباً كل مرجعية للأصول الفيزيائية، والتركيز فقط على المضمون الهندسي لما يريد أن يستكشفه. في حين انحصرت أعمال لورنز والآخرين في المعادلات التفاضلية التي تمثل التغيرات المستمرة في الفضاء وفي الزمن، اتجه هو إلى معادلات الفروق difference equations، حيث الزمن غير متصل، بل محدد بفترات. كان يعتقد أن الأساس يكمن في تكرار الطي والمط لفضاء الطور، على الصورة التي يصنع بها صانع الفطائر فطائره، حيث ينتهي إلى كومة من الطبقات الرقيقة. رسم هينون شكلاً بيضاوياً على ورقة، ولكي يطمه، اختار معادلة رقمية قصيرة يمكنها أن تنقل كل نقطة على البيضاوي إلى نقطة أخرى على شكل ممطوط لأعلى عند المنتصف، على هيئة قوس. تسمى هذه العملية رياضياً "تطبيق mapping"، فالشكل البيضاوي

بأكمله قد تم تطبيقه إلى قوس. ثم اختارنا تطبيقا آخر، في هذه الحالة يؤدي إلى انكماش القوس للداخل ليجعله أقل عرضا، ثم تطبيق آخر يدير القوس الضيق من أحد جانبيه، بحيث يتماشى بدقة مع البيضاوى الأول. التطبيقات الثلاثة يمكن أن تجتمع في معادلة واحدة لغرض الحسابات.

كانت روح العملية تتبع حدود سميل. ومن الناحية الرقمية فالعملية من السهولة بحيث يمكن أن تجرى حساباتها بألة حاسبة. كل نقطة لها إحداثيان، السيني والصادي. فلإيجاد الإحداثى السيني الجديد، القاعدة أن تضيف واحدا إلى قيمة الإحداثى الصادى السابق، ثم تطرح مربع قيمة الإحداثى السيني مضروباً فى ١٤، ولإيجاد الإحداثى الصادى الجديد، اضرب الإحداثى السيني فى ٠,٣ بمعنى آخر:

$$\text{س جديد} = \text{ص} + ١ - ١.٤ \text{ س}$$

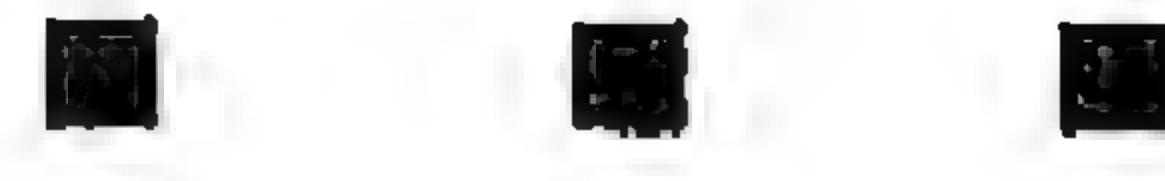
$$\text{ص جديد} = ٢ - \text{س}.$$

اختار هينون نقطة اعتباطية، وبدأ يجرى الحسابات حتى وصلت ألفا، ثم استخدم حاسوبا حقيقيا، ثم وصل بالحسابات سريعا إلى مليون.

فى البداية ظهرت النقاط تتبعثر عشوائيا على الشاشة، وهو فى الواقع عبارة عن وقع شرائح بوانكاريه للجاذب ثلاثى الأبعاد تُسجّل على الشاشة هنا وهناك، لم تتخذ شكلا واضحا بعد، ثم سرعان ما بدأت ملامح الشكل تظهر، خطوط عامة لشكل يشبه الموزة. وكلما استمر البرنامج فى العمل، ظهرت تفاصيل أكثر، فبعض الملامح العامة بدت وكأنها تتخذ سُمكا، ولكن هذا السمك لا يلبث أن يتحلل إلى خطين، ثم ينقسم الخطان إلى أربعة، زوج هنا وزوج على البعد. ومع زيادة التكبير يتضح أن الخطوط الأربعة هى فى الواقع أربعة من أزواج الخطوط، وهكذا، إلى ما لا نهاية. وكمثل جاذب لورنز، لقد أظهر جاذب هينون تراجعا مستمرا، أشبه بلعبة الدمى الروسية المتداخلة، ولكن بلا نهاية.

ويمكن للتداخل بين الخطوط أن يرى فى شكله النهائى من مجموعة من الصور تتدرج فى درجة تكبيرها. ولكن التأثير العجيب لهذا الجاذب الغريب يمكن أن يفهم بطريق آخر، حينما يتولد الشكل مع الزمن، نقطة بعد نقطة. إنه يكون كشبح يظهر فى الضباب، نقاط جديدة تتبعثر عشوائيا، لا تنبئ بانتسابها لأى شكل كان، ناهيك عن شكل غاية فى الدقة معقد التفاصيل. نقطتان متتابعتان تبدوان على بُعد من بعضهما البعض، كممثل نقطتين فى تدفق مضطرب كانتا متجاورتين فى البداية. من المستحيل أن نتوقع موقع أية نقطة تالية، عدا بالطبع أنها لا بد محتواة فى الجاذب.

النقاط تتبع عشر عشوائيا، والشكل يظهر أثريا، لدرجة أنه من السهل أن يُنسى أنه شكل للجاذب. إنه ليس مجرد خط بياني لنظام ديناميكي، بل هو الخط البياني الذي تنتهي إليه كافة الخطوط البيانية. لهذا ليست النقطة الابتدائية بذات قيمة على الإطلاق. فطالما أن نقطة البدء تقع قريبة بدرجة ما من الجاذب، فإن النقاط سريعا ما تتضام إليه.



فيما بعد، غذى التعرف على الجاذبات العجيبة ثورة الهيولية بأن أعطى المحللين الرقميين برامج محددة ينفذونها. إنهم يبحثون عن هذه الجاذبات في كل مكان، حيث يبدو وكأن الطبيعة تتصرف عشوائيا. جادل كثيرون أن طقس الكرة الأرضية يتبع جاذبا عجيبا، وجمع آخرون ملايين من أسعار أسواق السلع ليجعلوا عن جاذب عجيب، يرقبون العشوائية من خلال أجهزة الحاسوب طيعة التحكم.

في منتصف السبعينات كان اكتشاف هذه الأمور لا يزال متروكا للمستقبل. لم يرَ أحد حقيقة جاذبا عجيبا في تجربة، وكان من أبعد الأمور وضوحا كيف الطريق لرؤية واحد منها. نظريا يمكن للجاذب العجيب أن يعطي مادة رياضية لأساسيات الخواص الهيولية الوليدة، أحدها الحساسية المرهفة للظروف الأولية. وكان الخلط mixing هو الخاصية الثانية، بمعنى أكثر وضوحا لمصمم محرك نفث مثلا، مهتم بأكفاً نسبة خلط بين الوقود والأكسوجين. ولكن لم يكن يعلم أحد كيف يقيس هذه الخواص، أن يحدد لها قيما رقمية. كما بدت الجاذبات العجيبة منتمة لأشكال ماندلبروت الفراكتلية، مما يعنى أن أبعادها كسرية، ولكن لم يكن أحد يعلم كيف يقيس هذه الأبعاد، أو كيف يطبق مثل هذه القياسات على مشكلة هندسية.

والأهم من ذلك، لم يكن أحد يعلم ما إذا كانت الجاذبات العجيبة سوف تقول شيئا عن أعقد مشاكل النظم اللاخطية. فعلى عكس النظم الخطية؛ سهولة الحل والتصنيف، لا تزال النظم اللاخطية، في مضمونها، بعيدة عن التصنيف، كل نظام بعيد كل البعد عن الآخر. ربما يبدأ العلماء في احتمال وجود خواص مشتركة، ولكن حينما يحين وقت إجراء الحسابات والقياسات، يتضح أن كل نظام عالم قائم بذاته، ففهم نظام لا يغنى شيئا في فهم النظام الآخر. إن جاذبا مثل جاذب لورنز يبين الاتزان والهيكل الداخلى لنظام كان يُظن ألا نمط له، ولكن كيف يساعد هذا اللولب المزدوج الباحثين في نظم لا علاقة لها به. لا أحد يعرف.

إلى الآن، تجاوزت الإثارة العلم الخالص، فالعلماء الذين شهدوا هذه الأشكال سمحوا لأنفسهم أن ينسوا مؤقتاً قواعد الخطاب العلمي، رويل مثلاً قال: "إننى لم أتحدث عن السحر الجمالى للجاذبات العجيبة، هذه النظم من المنحنيات، هذه السحب من النقاط، توحى أحياناً بالألعاب النارية أو بالمجرات، وأحياناً تفرعات نباتية. إن عالماً يكمن فى هذه الأشكال ينتظر الاستكشاف، وتآلفا هارمونياً ينتظر من يكشف عنه".

-
- i لفظ "مانع" اسم جامع لكل من السوائل والغازات. المترجم
- ii عالم فيزيائى وضع نظرية الكوارك-المترجم
- iii صمم هذه التجربة العالم الفرنسى م. كوييت M. M. Couette فى مطلع القرن، وزاد العالم البريطانى جوفرى تايلور Geoffrey Taylor من سرعتها عام ١٩٢٣ وشاهد أشكال رصّة الكعك المذكورة، ويعتبر عمل سوينى وجولوب تطويراً لهذا المسار التجريبي. المترجم
- iv كانت نقطة الضعف دائماً فى كافة التجارب التى تجرى على السوائل هى كيفية قياس سرعتها، إذ كان يستخدم لذلك مجسات توضع فى طريق السائل، فتؤثر على السرعة المراد قياسها، وقد تغلب سوينى وجولوب على هذه الصعوبة بنثر قطع دقيقة للغاية من الألومونيوم فى السائل ينعكس عليها ضوء الليزر. المترجم
- v منذ أن وضع بوانكاريه فكرة فضاء الطور، والمشاهد أن مسارات النظم الديناميكية المستقرة فيه لا تخرج عن ثلاثة، بحسب تصرف النظام، فمن النظم ما يستقر على حالة ثبات، وهنا يقال إن فضاء الطور به "جاذب" ذو نقطة ثابتة fixed point attractor، وما ينتهى إلى حالة من الدورية يقال إن فضاء الطور له ذا جاذب ذو دورة محدودة limit cycle attractor، كما أن هناك حالة ثالثة يكون الاستقرار فيها على صورة معقدة، ويطلق عليها حالة شبه الدورية quasiperiodic، والجاذب فيها يكون معقداً (يأخذ شكل طارة torus)، ولكن المسارات فى فضاء الطور لا تستقر على حالة معينة، بل هى دائمة التقارب والتباعد، ولكنها فى نفس الوقت لا تتجاوز منطقة معينة من فضاء الطور، وهو ما يميزها عن حالة العشوائية أو النظم غير المستقرة، الأمر الذى أدى بتاكنز ورول إلى وضع مصطلح الجاذب الغريب (أو العجيب). المترجم
- vi الواقع أنها ثلاثة أنواع كما ذكرنا فى الهامش السابق، يرجع فى ذلك إلى Chaos Thoery tamed الموجود فى قائمة المراجع المذكورة بالكتاب. المترجم
- vii الاسم الذى كان يطلق على حالة الهولوية قبل أن يوضع لها الاصطلاح الخاص بها. المترجم
- viii انظر قاموس المصطلحات للتعرف على هذا المصطلح والمزيد من الشرح حول تطبيق هذا الأسلوب. المترجم
- ix يجدر التنويه بأن الجاذبات الغريبة تظهر فقط فى النظم التشتتية (انظر قاموس المصطلحات). المترجم
- x تعرف هذه الظاهرة فلكياً بظاهرة "المقلاع slingshot" - المترجم

العمومية

على بعد عدة ياردات من المسقط المائى، وقف ميشيل فايجنباوم يتطلع إلى التيار يمشى متهاديا قبل أن يتسارع في تموجات متلاطمة ترغى وتزبد. وقف ينفث دخان لفافته مستغرقا فى التفكير، ثم حدث نفسه قائلا: "بإمكانك التركيز على بقعة ما، أو تحريك رأسك بسرعة محاولا التقاط المنظر بأكمله، فتشعر به يسرى فى أحشائك، ولكن لو كان لديك خلفية رياضية، فسوف يغلبك الإحساس بالجهل".

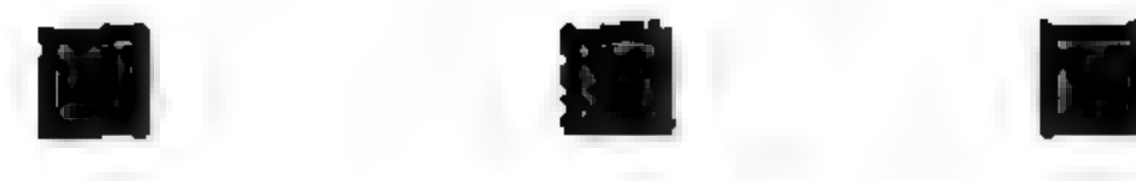
النظام فى الانظام: هذه أقدم عبارة نمطية فى تاريخ العلم البشرى. ففكرة وجود وحدة مكنونة أو شكل بدائى وراء كافة صور الطبيعة هى فكرة جذابة، وكان لها أثر بالغ فى إلهام أنصاف العلماء والمهوسين. حينما جاء ميشيل فايجنباوم إلى لوس ألاموس، عام ١٩٧٤، بعد أقل من عام من عيد ميلاده الثلاثين، كان يعلم أن الفيزيائيين لو كانوا بصدد فعل شيء الآن، فإنه يلزمهم إطار عملي، طريقة لتحويل أفكارهم إلى حسابات، ولم يكن واضحا بالمرّة كيف يقومون بأول خطوة فى اتجاه المشكلة.

حين ترأس بيتر كاوترز Peter Carruthers، عام ١٩٧٣ القسم النظرى بلاس ألاموس، عقد العزم على تجديد دمه بالنابغين من الباحثين الشبان. كان على الطموح، ولكنه كان يعلم من خبرته أن الفتوحات العلمية لا يمكن أن يخطط لها مسبقا.

"لو أنك شككت لجنة فى معمل وقلت: "علينا أن نفهم مشكلة الاضطرابات، فإن عدم فهمنا لها يقف عقبة فى سبيل التقدم فى مجالات كثيرة"، واشتريت الأجهزة المتطورة، والحاسبات فائقة القدرة، فقد تجد نفسك فى النهاية لم تصل إلى شيء ذى قيمة. إننا بدلا من ذلك قد وظفنا هذا الإنسان النابغ، يعمل أغلب وقته فى هدوء وصمت". لقد تحدثنا عن الاضطرابات، ولكن وصل الأمر إلى أنه حتى كاوترز لم يكن يعلم وجهة فايجنباوم. "كنت أعتقد أنه قد هجر المشكلة إلى شيء آخر. لم أكن أعلم أن هذا الشيء الآخر هو نفس المشكلة. لقد ظهر أنه الموضوع الذى يقف عقبة فى سبيل مجالات كثيرة، التصرفات اللاخطية للنظم. لم يكن أحد يعلم إلى هذا الحين أن الخلفية الحقة لهذه المشكلة تقتضى العلم بفيزياء الجسيمات الأولية والنظرية الكمية المجالية، وأنه فى

هذه النظرية توجد أساليب مثل إعادة الاستنظام renormalisation. لم يكن أحد يعلم أيضا الحاجة لمعرفة نظرية العمليات العشوائية (الصدفية) stochastic processes وهندسة ماندلبروت. كان لدى ميشيل هذه الخلفية جميعها، وقد قام بعمل الشيء الصحيح في الوقت الصحيح، كان عملا متكاملًا بكل المعايير.

جاء فايجنباوم إلى لوس ألاموس باعتقاد أن العلم الذي ينتمى إليه قد فشل في حل معضلة اللاخطية. وعلى الرغم من أنه كفيزيائي لم ينتج الشيء الكثير، فقد كانت لديه خلفية عقلية غير عادية. كان لديه علم حاذق بأغلب المسائل الرياضية، وتقنيات الحواسيب الحديثة التي استنفدت طاقات أغلب العلماء. وقد نجح في ألا يطرد من ذهنه بعضا من رومانسيات القرن التاسع عشر التي كانت تبدو غير علمية. كان يريد أن يشتغل بعلم حديث، وبدأ بطرح أية فكرة عن التعقد جانبا، واستبدل بها أبسط معادلة تحت يديه.



تجلى لغز الكون أول ما تجلى لدى ميشيل ذي الأربعة أعوام عن طريق المذياع الذي كان في غرفة المعيشة بمنزله في بروكلين بعد الحرب بقليل. كان يخلب لبه هذه الموسيقى الآتية من غير مكان. أما الفونوغراف فكان يشعر بأنه يفهمه، فجذته كانت تعطيه الاسطوانات وتعلمه كيف يشغلها.

كان في ذهن ميشيل أن يمتحن هندسة الكهرباء، والتي كانت تُدرّ دخلا لا بأس به وقتها. ولكنه أدرك فيما بعد أن ما أراد أن يعرفه عن المذياع يوجد في مجال الفيزياء. كان من بعض العلماء النابهيّن الذين تخرجوا من أشهر دور العلم في ضواحي نيويورك، منها سيتي كولاج.

كان تطوره في اتجاه النبوغ يعنى تعارضا بين وجهته العلمية وعلاقاته الاجتماعية. لقد بدأ حياته بين الناس، ولكنه بالتدريج علم أنه لكي يحصل شيئا من علم حقيقى عليه أن يتباعد شيئا ما، فالأحاديث العامة لم تكن تثير اهتمامه. وفي آخر سنة في دراسته خطر بباله أنه قد فقد فترة مراهقته، فقرر أن يعوضها باستعادة علاقاته الإنسانية. كان يجلس في مقصف الكلية يستمع لمناقشات الطلبة حول الأكل أو الحلاقة، وبالتدريج عاد لمعرفة كيفية التحدث مع الناس.

وتخرج عام ١٩٦٤، والتحق بمعهد M.I.T، حيث حصل على الدكتوراه في فيزياء الجسيمات الأولية. بعد ذلك قضى أربع سنوات غير مثمرة في كورنل ومعهد فيرجينيا

التقنى، غير مثمرة بمعنى عدم نشره لبحث فى مسألة من المسائل التقليدية، رغم علمه بأهمية ذلك لمستقبل باحث شاب.

وفى لوس ألاموس كان كاوترز، عالم فذ فى حد ذاته، يفخر بمقدرته على استقصاء النبوغ. لم يكن يبحث عن الذكاء، بل عن الإبداع الذى يلوح أنه ينبع من غدة سحرية. كان يذكر على الدوام قصة كينيث ويلسون Kenneth Wilson الذى بدا بدوره أنه لا ينتج شيئاً البتة. كان يبدو لأى شخص بعد مدة من الحديث أن لديه فكراً عميقاً فى الفيزياء، ومن ثم فقد كانت مقدرته العلمية مثارا للجدل. ثم ما لبث أن توالى أبحاثه بشكل مكثف كانهيار لسد مائي، ومنها البحث الذى حاز به جائزة نوبل عام ١٩٨٢.

كانت مساهمة ويلسون أساساً فى الفيزياء، هو واثنان آخريان؛ ليو كادانوف Leo Kadanoff وميشيل فيشر Michael Fisher. كان ثلاثتهم يتساعلون، كل على حدة، عما يحدث فى التحول الطوري. وقد رأى كادانوف عام ١٩٦٠ كيف أن هذا التحول يمثل لغزاً. خذ قضيباً من الحديد يمغنط، يمكن أن يكون توجيه المغناطيس فى هذا الاتجاه أو ذاك، الأمر حرية مطلقة، ولكن كل جزيء فى المعدن يجب أن يتخذ نفس القرار، فكيف؟

بصورة ما، يجب أن تنقل المعلومات عن عملية الاختيار من ذرة إلى أخرى، ولقد رأى كادانوف بثاقب بصره أن هذا الاتصال يجب أن يتم بصورة مقياسية، بمعنى أنه تخيل تقسيم المعدن إلى أجزاء، كل جزء يتصل بالجزء المجاور له مباشرة. وطريقة وصف هذا الاتصال تماثل طريقة الاتصال على مستوى الذرات تماماً. هنا تكمن أهمية المقياسية: أفضل طريقة ينظر فيها للمعدن هى على صورة شكل من أشكال ماندلبروت، صناديق بمقاييس متدرجة.

تطلب تأصيل هذه القدرة للمقياسية الكثير من التحليلات الرياضية، والكثير من الإلمام بالنظم الواقعية. شعر كادانوف أنه قد اتخذ طريقاً غير ممهد، وأنه خلق عالماً مليئاً بالجمال المبهر والاستقلالية، جزء كبير من جماله يكمن فى عموميته universality، وتمثل فكرته العمود الفقري لحقيقة صارخة عن ظاهرة حساسة للغاية، ألا وهى أن هذه التحولات غير المترابطة، غليان السوائل ومغنطة المعادن، كلها تخضع لنمط واحد من القواعد.

ثم قام ويلسون بجمع شمل النظرية تحت إطار نظرية الاستنظام، مقدماً طريقة قوية للقيام بعمليات حسابية حقيقية عن نظم حقيقية. قد دخلت نظرية إعادة الاستنظام

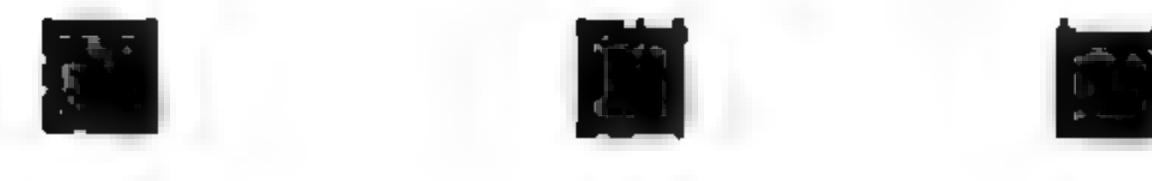
علم الفيزياء، وبالتحديد النظرية الكمية فى الأربعينات لتساعد على التخلص من اللانهايات التى كانت تظهر عند حساب التفاعل بين الجسيمات الأولية. وكانت هذه اللانهايات هى التى تقلق كادانوف وويلسون، ومن ثم فقد لجئوا إلى تطبيق إعادة الاستنظام كما يطبقها علماء النظرية الكمية.

فقط فى الستينات شق ويلسون طريقه بنجاح فى عملية إعادة الاستنظام. وكما فعل كادانوف، واثته فكرة المقياسية. هناك بعض الكميات، كالكتلة، تعتبر ثابتة طبقاً لخبرات الحياة اليومية، وقد نجح طريق إعادة الاستنظام المختصر فى أن ينظر إليها ككمية تتغير صعوداً وهبوطاً طبقاً لوجهة نظر الناظر إليها. يبدو ذلك سخفًا، ولكنه التماثل الحقيقى لوجهة نظر ماندلبروت حول إدراك أشكال الهندسية وشواطئ البحار والمحيطات، والتى لا يمكن التفكير فى أطوالها على استقلال من المقياسية. إن الأمر نسبى بحسب قرب أو بعد الناظر أثناء القياس، هل هو قريب أم فى مركبة فضائية. وكما رأى ماندلبروت، فإن التغير عبر المقاييس ليس أمراً اعتباطياً، بل يتبع قواعد محددة. فالتغير فى الكتلة أو فى الطول يعنى وجود خاصية أخرى لا تتغير. فى حالة أشكال ماندلبروت، هذه الخاصية هى البعد الكسرى، مقدار ثابت يمكن تقديره حسابياً، واستخدامه فى حسابات أخرى. والسماح للكتلة أن تتغير مقياسياً يعنى أن الرياضيين يمكنهم التعرف على تماثل عبر المقاييس.

هكذا شقت إعادة الاستنظام كما يطبقها ويلسون طريقاً مختلفاً عبر المشاكل العويصة. لقد كانت الوسيلة إلى ذلك الحين للتعامل مع النظم اللاخطية هى تقريبها إلى أقرب نظام خطي، وتُحل المسألة على هذا الأساس، ثم تجرى عملية تقريب للنظام الفعلي، وعلى أساس درجة الدقة المطلوبة فى التقريب. كانت تعتمد عملية التقريب على ما يسمى أشكال فاينمان Feynman diagrams، وكلما زادت دقة التقريب المطلوبة، زاد عدد عمليات استخدام هذه الأشكال. كان أمراً مُتعباً للغاية، علاوة على اعتماد هذه الطريقة على الحظ بشكل ملحوظ. وقد وجد فاينجناوم نفسه، ككل باحث فى مجال فيزياء الجسيمات، يقوم بعدد لا يحصى من تطبيق هذه الأشكال. وقد خُلف ذلك لديه شعوراً بأنها طريقة مرهقة قاتلة للإبداع، ومن ثم فقد أحب طريقة ويلسون فى إعادة الاستنظام. فعن طريق التعرف على التشابه الذاتى، يتم تبسيط التعقيد مرحلة بعد أخرى.

فى التطبيق العملى كانت طريقة إعادة الاستنظام أبعد ما تكون عن وسيلة ميسرة تماماً، فهى تعتمد على قدر كبير من الذكاء للقيام بعمليات الحساب الملائمة للوصول إلى التماثل الذاتى. ولكنها مع ذلك كانت ناجحة بقدر كبير، بالقدر الذى جعلها مصدر

إلهام للفيزيائيين، بما فيهم فايجنباوم، لكي يطبقوها على مسائل الاضطرابات. فالاضطرابات قبل كل شيء تتمتع بالتماثل الذاتي، ترددات فوق ترددات، دوامات فوق دوامات. ولكن، ماذا عن بدء الاضطراب، تلك اللحظة الغامضة حين يتحول نظام منتظم إلى هولي؟ لم يكن هناك من دليل على أن وسيلة إعادة الاستنظام يمكن أن تقول شيئاً بهذا الخصوص. لم يكن هناك دليل، مثلاً، على أن هذا التحول يتبع قوانين المقياسية.



خلال فترة التحاق فايجنباوم بـ MIT، حدث أن مرَّ بمجموعة جالسة في منتزه، يستمتعون بالغذاء وتجاذب أطراف الحديث، وأخذ يلتفت وراءه ناظراً إليهم على فترات من ابتعاده عنهم، يتأمل تضاؤل أشكالهم وخفوت أصواتهم، إلى أن أصبحت أشكالهم غير مميزة، وأصواتهم غير مفهومة، وحركات أيديهم وأبدانهم مشوشة لا تفهم، سارحاً بفكره في هذه الظاهرة المألوفة. لماذا حين تصغر الأشياء، تكون غير مفهومة؟

حاول جاهداً وبكل جدية أن يحل هذه التجربة عن طريق آليات الفيزياء النظرية، متسائلاً عما يمكنه أن يقول حول إدراك العقل البشري. إنك ترى بعض الحركات البشرية، ثم تستنبط منها أشياء. فمع اعتبار العدد الهائل من المعلومات المتاحة أمام أحاسيس البشر، كيف تقوم عدة التكويد لديك بتصنيفها؟ من الواضح، أو من الواضح بقدر كبير، أن العقل لا يختزن نسخاً مباشرة لكل ما في الكون من أشياء. إنه لا يملك مكتبة لكل الأشكال والأفكار يقيس على ضوئها الصور الذهنية خلال الإدراك. إن المعلومات مخزنة بطريقة مرنة، تسمح بالتبديل والتنسيق وإثارة الخيال، تكمن فيها صورة من الهولية، ويبدو أن للعقل مرونة أعلى مما لدى الفيزياء التقليدية في الكشف عن النظام بها.

في نفس الوقت، كان فايجنباوم يفكر في الألوان، والتي دارت حول ماهيتها معركة في بداية القرن التاسع عشر حول رأي نيوتن ورأي جوته بهذا الخصوص. بالنسبة لأراء نيوتن الفيزيائية، لم يكن رأي جوته يزيد عن أن يكون مجرد تهويمات على هامش العلم. لقد رفض مبدأ أن اللون خصيصة استاتيكية، يمكن قياسها معملياً ثم تثبيتها كما يفعل بفراشة على لوحة حائطية. لقد بنى جدله على أن اللون حقيقة إدراكية، وقد كتب قائلاً: "بين التوازنات والتوازنات المضادة للضوء، تتأرجح الطبيعة بين حدودها المرسومة. وهكذا تنشأ ظاهرة الألوان بكافة الاختلافات والظروف التي تقدم لنا من خلالها في الفضاء والزمن.

كان حجر الزاوية فى رأى نيوتن هو تجربة المنشور الذى حلل به الضوء، وبقفزة عبقرية تخيل أن الاختلاف له علاقة بتردد شيء ما، أسماه جسيمات. واليوم يعتبر اللون الأحمر مثلاً هو تردد الموجات الكهرومغناطيسية بين طول ٦٢٠ و ٨٠٠ جزء من بليون جزء من المتر. وبينما ذاعت أبحاث نيوتن كالنار فى الهشيم، توارت أبحاث جوته فى طى النسيان.

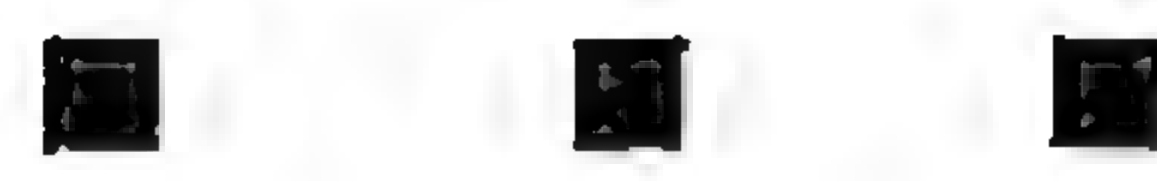
وظل فايجنباوم يجتهد للحصول على نسخة منها حتى وفق بعد عناء، ليجد أن جوته قد قام بالفعل بمجموعة من التجارب الغريبة خلال بحثه عن ماهية الألوان. لقد بدأ كما بدأ نيوتن، بالمنشور الزجاجي، ولكن بدلاً من أن يسلط عليه الضوء، نظر من خلاله. إنه لم ير أى لون على الإطلاق، لا قوس قزح ولا أى تدرج لوني آخر.

ولكن، ما أن يعترض الصفحة البيضاء شيء ما، كبقعة صغيرة أو سحابة فى السماء، حتى تتفجر الألوان، فاستتبط من ذلك أن ما يسبب الألوان هو التبادل بين الضوء والظلال. واستمر يدرس كيف يدرك الناس الظلال التى تصنع بمصادر لونية مختلفة، واستخدم فى ذلك الشموع والأقلام والمرايا والزجاج الملون وضوء الشمس والقمر والبلور والسوائل والعجلات الملونة. كان يضيء شمعة مثلاً أمام صفحة بيضاء من الورق عند الغسق، ثم يمسك بالقلم. كان الظل الملقى أزرق، فلماذا؟ الورقة فى حد ذاتها تدرك كبيضاء، سواء فى ضوء النهار المنصرم أم فى ضوء الشمعة الخافت، فكيف قسمها الظل إلى منطقة زرقاء ومنطقة من الأحمر الضارب للصفرة؟ إن اللون هو نوع من الظلام، ينتمى إلى الظلال كما اتجه رأيه. وبعبارة العلم الحديث، يأتى الضوء من الظروف المحيطة والخصائص الذاتية.

بينما كان نيوتن تجزيئياً كان جوته شمولياً. فنيوتن جزأ الضوء أجزاءً، ووجد أبسط شرح فيزيائى للألوان. أما جوته فقد سار خلال الحقائق ودرس اللوحات، باحثاً عن تفسير أكثر عمقا وإحاطة. نيوتن وضع رأيه فى إطار رياضى يصلح للفيزياء، بينما جوته، لحسن الحظ أو لسوءه، قد هجر الرياضيات كلية.

أقنع فايجنباوم نفسه بأن جوته كان محقاً بشأن الألوان. كان رأيه يميز، كما هو شائع فى علم النفس، بين الحقيقة الفيزيائية الثابتة، والإدراك الشخصى لها فى هيئة صور مرنة. لقد رأى فايجنباوم آراء جوته تحمل قدراً أكبر من العلم الحقيقى. كانت صعبة وتجريبية، فمرات ومرات كان جوته يركز على قابلية تجاربه للتكرار. لقد كان إدراك الألوان، بالنسبة لجوته، هو الأمر الذى يتسم بالعمومية والموضوعية. فأين هو البرهان العلمى على وجود حقيقة فيزيقية عن الاحمرار، دون أخذ الإدراك فى الاعتبار؟

وجد فايجنباوم نفسه يتساءل عن نوع الصيغة الرياضية التي يمكن بها التعبير عن الإدراك الإنساني، خاصة الإدراك الذي يمحّص كمية من التجارب المشوشة ويستخلص منها خصائص عامة. إن الاحمرار ليس بالضرورة مدى خاصاً في الطيف الضوئي، كما ذهب نيوتن. إنه منطقة من كون هيولي، وحدود هذه المنطقة ليست ميسرة للتعبير عنها، ولكن عقلنا يجد الاحمرار بانتظام ومع كافة المتغيرات. كانت هذه أفكار فيزيائي شاب، بعيدة كما يبدو عن مسألة اضطراب السوائل. على أنه لكي يفهم كيف يقوم العقل البشري بالتصنيف خلال هيولية الإدراك، بالتأكيد يجب أن يعرف المرء كيف ينتج الانظام العمومية.



حينما بدأ فايجنباوم في التفكير عن اللاخطية في لوس ألاموس، أدرك أن تعليمه لم يعطه شيئاً نافعا. فحل نظم من معادلات تفاضلية لاخطية أمر مستحيل، بصرف النظر عن الأمثلة الخاصة الموجودة في المراجع. وأسلوب التصحيحات المتوالية أملاً في إيجاد حل تقريبي للحل الحقيقي يبدو أمراً غيبياً. وقد قرأ في المراجع عن التدفق والترددات اللاخطية، وقرر أنها لا تحوى شيئاً يذكر يساعد في وضع فيزياء معقولة. وبأدوات الحساب المتاحة لديه مع الورقة والقلم، قرر أن يبدأ بمعادلة في بساطة معادلة ماى في دراسة التعداد البيولوجي، وهي المعادلة اللوجستية $V = M(1 - S)$. وحتى يمكن رؤية نتيجة الحساب واضحة، فإنها توقع على شكل بياني، ويعرف المنحنى الناتج بأنه قطع مكافئ.

• ولم يكن الموضوع بالنسبة إلى فايجنباوم أو ماى هو إجراء الحساب مرة، بل مرات عديدة يكون ناتج كل مرة هو مدخل المرة التالية. وهكذا استعويض عن الحسابات المعقدة للفيزياء التقليدية، بعمليات بسيطة ولكن كثيرة التكرار. يراقب من يجري هذه الاختبارات الرقمية العملية كما يراقب من يجري الاختبارات الكيميائية نتيجة التفاعل في دورقه. هنا يكون الناتج مجموعة من الأرقام، ليست دائماً متقاربة إلى حالة الثبات، بل قد تنتهي إلى حالة ترددية بين قيمتين. وقد تنتهي، كما بين ماى، إلى حالة هيولية تظل على حالها من التغير طالما استمر أحد في مراقبتها. تعتمد الحالة التي ينتهي إليها على معامل الضبط $tuning\ parameter$.

قام فايجنباوم بهذه التجربة الرقمية، وفي نفس الوقت قام بالمزيد من المحاولات مع الطرق التقليدية في تحليل المعادلات اللاخطية. كان الأمر غير مجدٍ، وفي نفس الوقت

علم أن ثلاثة من رياضيين لوس ألاموس: نيكولاس متروبوليس Nicholas Metropolis وويل ستاين Paul Stein وميرون ستاين Myron Stein قد قاموا بمثل هذه التحليلات من قبل، ولكن الصعوبة البالغة أقعدتهم عن المتابعة. ولذا فقد وضع فايجنباوم الموضوع على الرف.

في تاريخ الهيولية القصير، هذه المعادلة البريئة تبين بكل جلاء كيف ينظر العلماء لمشكلة ما من زوايا مختلفة. بالنسبة للبيولوجي، كانت تحمل رسالة: النظم البسيطة يمكن أن تنتج أشياء معقدة. بالنسبة لرياضي لوس ألاموس الثلاثة، كانت المشكلة هي وضع كتالوج من مجموعة من نماذج طوبولوجية دون الرجوع إلى أية قيم رقمية. كانوا يبدعون عملية التغذية الخلفية عند نقطة معينة، ثم يتابعون القيم تتراقص من مكان لآخر على منحنى القطع المكافئ،

لم يدرك أحد ذلك في هذا الوقت، ولكن لورنز كان قد نظر إلى نفس المعادلة عام ١٩٦٤، كمثال لسؤال أعمق عن الطقس. هل للطقس قيمة متوسطة على المدى البعيد؟ أغلب علماء الطقس، وقتها والآن، يأخذون الإجابة بالإيجاب قضية مسلم بها. بالتأكيد أية قيم مقيسة، بصرف النظر عن كيفية تذبذبها، يجب أن يكون لها قيمة متوسطة. وكما بين لورنز، فإن القيمة المتوسطة للطقس في ١٢٠٠٠ عاما الأخيرة تختلف عنها لفترة ١٢٠٠٠ عام السابقة عليها، حين كانت أمريكا الشمالية مغطاة بالجليد. هل كان هناك طقس معين وقد تغير إلى طقس آخر لسبب فيزيائي؟ أم هناك فترة زمنية أطول يمكن اعتبار هاتين الفترتين مجرد تذبذبات خلالها؟ أم ترى يمكن اعتبار أن نظاما كالطقس لا يتقارب أبدا إلى متوسط معين؟

وسأل لورنز سؤالا ثانيا؛ لنفرض أنك استطعت بالفعل كتابة مجموعة من المعادلات للقوانين التي تحكم الطقس، هل يمكنك عن طريقها حساب متوسطات إحصائية لدرجات الحرارة أو معدل الأمطار؟ لو أن المعادلات كانت خطية، لكنت الإجابة بكل سهولة نعم، ولكنها غير خطية. و الرب لم يجعل مثل هذه المعادلات متاحة، فإن لورنز قد اتجه إلى معادلة الفروق التربيعية quadratic difference equation.

وكما فعل ماي، قام لورنز بتكرار حساب المعادلة بمعاملات معينة. عند معدل معين كانت المعادلة تنتهي إلى نقطة ثابتة مستقرة. هنا ينتج النظام "طقسا" بالمعنى السطحي، ثابت لا يتغير. ومع معدل أعلى، وجد الطقس يتأرجح بين حالتين، ويؤول إلى متوسط ثابت. ولكن بعد قيمة معينة، وجد حالة الهيولية تبرز. وحيث إنه كان يفكر في الطقس، لم يكن يسأل عما إذا كانت التغذية الخلفية سوف تنشئ تصرفا دوريا، بل

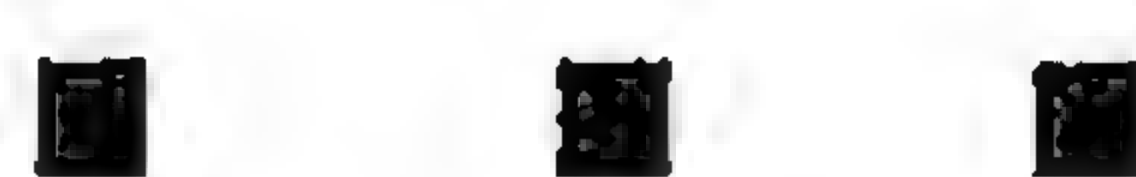
أيضا عن قيمة المتوسط، وكان يعلم أن المتوسط بدوره يتأرجح غير مستقر. فحين يتغير العامل بدرجة طفيفة، فإن المتوسط يتغير بصورة جسيمة. وبنفس الطريقة، لا يُنتظر أن يستقر طقس الكرة الأرضية على متوسط على المدى البعيد.

كبحث رياضي، يُعتبر بحثاً فاشلاً، فهو لم يبرهن على شيء بالمعنى الرسمي. وكبحث فيزيائي، فهو أيضا مليء بالعيوب، لأنه لم يستطع أن يبرر استخدامه لهذه المعادلة في حسابه للطقس الأرضي. ولكن لورنز كان يعرف ما يقول. كان لورنز قد بدأ يفهم بعمق أكثر عن احتمالات النظم الهولوية، عمق أكبر من أن يعبر عنه بلغة الطبيعة الجوية.

وبينما هو مستمر في استكشاف الأقفنة المتغيرة للنظم الديناميكية، أدرك لورنز أن النظم الأعقد قليلا عن المعادلة المذكورة، يمكن أن تنتج نظاما غير متوقعة. فبداخل نظام معين يمكن أن تختبئ أكثر من حالة استقرار واحدة. قد يرى المراقب تصرفا مستقرا على مدى طويل من الزمن، ولكن تصرفا آخر تماما للنظام قد يبدو طبيعيا كالأول بالضبط. مثل هذا النظام يسمى "لا متعدى Intransitive"، فهو يستقر على حالة من الحالتين، ولكنه لا يجمع بينهما. فهو محتاج لركلة من خارج النظام لكي ينقلب من حالة إلى حالة أخرى. إن نظاما واضحا من هذا القبيل هو بندول الساعة، حيث يعوض الطاقة التي يفقدها من الاحتكاك من مصدر طاقة خارجي كزنبرك أو بطارية كهربائية، فيستقر علىذبذبة معينة. فلو أن عابرا هز البندول، فهو قد يسرع أو يبطئ وقتيا، ولكنه سوف يعود لتردده الأصلي. على أنه للبندول حالة استقرار أخرى، حل صحيح لمعادلة الحركة، وهو حالة السكون. وكمثال أقل وضوحا لنظام من هذا القبيل، وربما بأكثر من حالة استقرار، قد يكون الطقس الجوي ذاته.

منذ وقت طويل يعرف علماء الطقس الذين يستخدمون نماذج حاسوبية لتمثيل تصرف الطقس والمحيطات على المدى الطويل أن هذه النماذج تسمح على الأقل بحالة توازن أخرى تختلف اختلافا بيّناً. خلال العصور الجيولوجية الماضية، لم يحدث هذا المناخ البديل، ولكنه يمكن أن يكون حلا صحيحا للمعادلات التي تحكم الطقس الجوي. إنه ما يسمونه "الطقس الأرضي الأبيض"، طقس للأرض يغطي قاراتها الجليد ومحيطاتها الثلوج. إن سطح الأرض في هذه الحالة سوف يعكس سبعين بالمائة من الطاقة الشمسية، ومن ثم تظل البرودة قارصة. وسوف تنكمش طبقة التروبوسفير- الطبقة السفلى من الهواء الجوي- بدرجة كبيرة، وتقل حدة الرياح كثيرا. على وجه العموم، سوف يكون الطقس أقل استضافة للحياة عما هو الآن. وللنماذج الحاسوبية ميل شديد للوقوع في قبضة توازن الطقس الأبيض هذا، لدرجة أن علماء الطقس يتعجبون لماذا لم يتحقق إلى الآن، ولعلها مجرد صدفة.

ولدفع الأرض إلى هذا الطقس يحتاج الأمر إلى ركلة قوية من مصدر خارجي. ولكن لورنز وصف نوعاً آخر من التصرفات المقبولة علمياً، قريب الشبه بالنظام الأول، فيه يستقر النظام على التذبذب حول متوسط معين لمدة طويلة، ثم بلا سبب على الإطلاق يتحول إلى نمط آخر، يتذبذب فيه حول متوسط آخر. ويعرف مصممو النماذج الحاسوبية باكتشاف لورنز هذا، ولكنهم يتحاشونه تماماً، فهو غير قابل للتوقع بقدر كبير. إن انحيازهم الطبيعي هو لصالح بناء نماذج لها ميل للعودة إلى التوازن كما نراه الآن في جو الأرض. أما لتفسير التغيرات الضخمة، فهم يقدمون تبريرات أخرى، مثل تغير مسار الأرض حول الشمس. ولكنهم يعرفون تماماً أن حل لورنز يمكن أن يفسر انحراف طقس الأرض نحو العصور الجليدية دون سبب معروف على فترات غير منتظمة. لو كان الأمر كذلك، فسوف يغنينا عن البحث عن تفسيرات، إنها نتاج طبيعي للهيولية.



مثلاً يحزن جامع الأسلحة النارية في عصر الأسلحة الأوتوماتيكية إلى طراز عتيق، يشعر بعض العلماء اليوم بحزن إلى الآلة الحاسبة HP-65 اليدوية. في عصر تسيد هذه الآلة، أمكنها أن تغير من عادات الكثير من العلماء نهائياً. بالنسبة إلي فايجنباوم كانت المعبر بين الورقة والقلم، وبين الحاسوب الشخصي الذي لم يكن متصوراً بعد.

لم يكن فايجنباوم يعرف شيئاً عن لورنز، ولكن في مؤتمر بأسبن، كولورادو، سمع ستيف سمول يتحدث عن بعض الخصائص الرياضية لنفس معادلة الفروق التريعية. كان سمول يظن، بفريزته عن المواضيع الحساسة، أن الموضوع سوف يفتح الباب لأسئلة حول النقطة المحددة للتحويل من النظام إلى الهيولية. وبالفعل قرر فايجنباوم أن يغوص فيها بعمق مرة أخرى، وانطلق بآله الحاسبة يجرى مجموعة من الجبر التحليلي والاستكشافات الرقمية لكي يلم شمل فهمه عن المعادلة، مركزاً على الحدود بين النظام والهيولية

وفقط على سبيل التمثيل، كان يعلم أن هذه المنطقة أشبه بالحدود الغامضة بين التدفق السلس والمضطرب. إنها المنطقة التي أثار روبرت ماي انتباه البيولوجيين المهتمين بالتعداد إليها، والذين لم يكونوا يتخيلون شيئاً غير الدورية المنتظمة في تغير تعداد الكائنات. يتمثل الطريق إلى الهيولية خلال هذه المنطقة سلسلة من تضاعف الفترة، انقسام الفترتين إلى أربعة، والأربعة إلى ثمانية، وهلم جرا. لقد أنتجت هذه الانقسامات نمطاً مثيراً للإعجاب. إنها النقاط التي فيها تؤدي التغيرات الطفيفة في الخصوبة مثلاً إلى تغير فترة الأربع سنوات إلى ثمانى سنوات. وقرر فايجنباوم أن يبدأ في حساب العامل الذي ينتج هذا الانقسام.

فى النهاىة؁ كان بَطء الآلة الحاسبة هو ما أءى إلى كشفه. لو أنه اسءءءم حاسوباً بقءرءه الفائقة؁ لما قدر له أن ىرى نمطاً على الإءلاق. لقد كان مضطراً لءءابة الأرقام بالىء؁ ثم ففكر فىها بىنما هو ىءءظر؁ وبعءها؁ لكى فوفر الوقت؁ ففءمن ما ءكون علىه الأرقام ءالآىة.

وففءأة أءس بأنه لىس مضطراً للءءمىن. لقد كان هناك انءظام ففر مءوءع مءءبى فى اللانءظام. كانت الأرقام ءءقارب هندسىاً؁ بنفس طرىقة ءقارب صف من أعمءة الءاءف نحو الأفق فى رسم المنظور؛ لو عرفء ارءفاع عموءىن فىه؁ لعرفء ارءفاع بقىة الأعمءة؁ فالنسبة مءفوظة بىن الأعمءة. لم فكن ءضاعف الفءراء فءوالى بسرعءة؁ بل كان فءوالى أفضاً بمعءل ءابء.

لماذا ففب أن فكون الأمر كءلك؟ إن وفوء ءءقارب الهندسى فعى عاءة أن شىئاً ما؁ فى مكان ما؁ فكرر نفسه على مقافىس مءءلفة. ولكن لو كان هناك نمط مقافسى فى هءه الءالة؁ ففإن أءءاً لم فلفظه للآن. وءسب فاففءنباوم نسبة ءءقارب بأكبر ءقة ءءفحها آله؁ ءلآة أرقام عشرىة؁ وكانت الفءفءة ٦٦٩. ٤ هل فعى هءا الرقم بالءاء شىئاً ما؟ وقام فاففءنباوم بما فقوم به أى إنسان على علاقة قوىة بالأرقام؁ أن فءاول رفب الرقم بأى ءابء من ءءابء الرىاضىة المءروفة كالنسبة ءءرفىبىة؁ ءون ءءوى.

ومن الفرفب أن ماى قد أءرك بعء ءلك أنه أفضاً قد شاهد هءا ءءقارب الهندسى؁ ولكنف نسىف بنفس السرعءة ءى شاهدف بها. ففمن وفءة نظر ماى فى النظم البىئىة؁ لم فمءل سوى رقم من الأرقام لىس إلا؁ ففى العالم الواقعى للنظام الذى كان فقوم بءراسءف؁ ءعءاء الكائناء أو الاقءصاء؁ ففإن ءءشوش فى هءه النظم فمكن أن فغطى على أية ءفاففل بهءه الءقة. لقد كان مءأثراً بالسلوك الشامل للمعاءلة؁ فلم فءففل قط أن ءءللل الرقمى له أهمىة ءءكر.

كان فاففءنباوم فعلم ما حصل علىف؁ لأن ءءقارب الهندسى فعى أن ءمة شىئاً ما فى المعاءلة فءصرف بطرىقة مقافسىة؁ وأن هءه المقافسىة لها أهمىءفها. فنظرىة إعاءة الاسءءءام برمءفها ءعءمء علىها. ففى نظام ففءو أنه بلا ضوابط؁ ءعنى المقافسىة أن هناك ءصفىصة ما ءابءة بىنما الكل فءففر؁ شىء من انضباط فءءفى ءءء سطح الاضطراب. ولكن أفن؟ كان صعباً علىف أن فعرف ءطوءف القاءمة.

وفى أواءر أءءوبر؁ ءطراء له ءاطرة. لقد كان فعلم أن مءروبولفس وسءافن وسءافن قد بءءوا معاءلاء أءرى أفضاً ووفءوا بعض الأنماط ءنءقل من معاءلة لأءرى. كانت إحدى المعاءلاء ءالة مءءنىة؁ ءءءوى على ففب المءفر؁ إذ كانت على الصورة: $v = r \cdot \omega$ (ءفء ط النسبة ءءرفىبىة)؁ وبءأ فءرى ءساباء علىها كما سبىق. كان

حساب النسب المثلثية يجعل العملية أشد بُطناً، ولكنه حين حسب التقارب وصل إلى نسبة بدقة ثلاثة أرقام عشرية، وكانت ٤.٦٦٩.

شيء لا يكاد يُصدق، هذه المعادلة المثلثية لم تكن فقط تبدى ثباتاً وانتظاماً هندسياً، بل كانت تبدى انتظاماً يتساوى رقمياً مع انتظام دالة أبسط منها بمراحل. ليس في عالم الرياضيات أو الفيزياء ما يبين كيف يمكن لمعادلتين تنتميان إلى نوعين مختلفين تماماً أن تؤديا إلى نفس النتيجة.

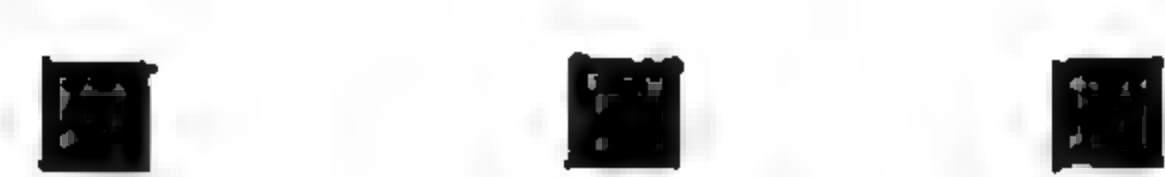
استدعى فايجنباوم زميله بول ستاين، الذي لم يثره هذا التوافق العرضي، فالدقة مهما كانت منخفضة. واتصل فايجنباوم بوالديه، قائلاً إنه قد توصل إلى شيء سوف يحقق له الشهرة. ثم انكب على كل ما أمكنه من معادلات تحتوى على تسلسل من التفرع الثنائي وهو بسنييه للاضطراب، وأنتجت كل معادلة نفس الرقم.

لقد تلاعب فايجنباوم بالأرقام كثيراً، كان في فترة المراهقة يحسب اللوغارتمات والنسب المثلثية التي تستخرج عادة من الجداول الرياضية. ولكنه لم يكن يعرف كيف يعمل مع حاسوب أكبر من آلة الحاسبة، وكان في ذلك يعتبر فيزيائياً ورياضياً نمطياً، يميل إلى ازدراء التفكير الميكانيكي الذي يمثله العمل بواسطة الحاسوب. والآن، حان الأوان لتغيير رأيه. تعلّم فورتران، وقام بالحساب بدقة أكبر، إلى خمسة أرقام عشرية، ٤.٦٦٩٢٠. وفي اليوم التالي زاد من الدقة، ٤.٦٦٩٢٠.١٦٠٩٠، دقة تكفى لإقناع بول ستاين. ورغم ذلك، لم يكن فايجنباوم واثقاً من أنه أقنع نفسه. لقد بدأ بالبحث عن الانتظام، فهذا ما يعنيه فهم الرياضيات. ولكنه أيضاً قد بدأ عالماً بأن بعض المعادلات المعينة، بالضبط كبعض النظم الفيزيائية الخاصة، تتصرف بأسلوب خاص متميز. وقد كانت هذه المعادلات قبل كل شيء بسيطة. كان فايجنباوم يفهم معادلة الفروق التربيعية، والمعادلة الجيبية، ليس فيهما من صعوبة الرياضيات شيء يذكر. ولكن شيئاً ما في قلب هاتين المعادلتين المختلفتين يتكرر، منتجا رقما موحدا بينهما، هل بالفعل قد اكتشف قانوناً جديداً من قوانين الطبيعة، أم أن الأمر مجرد اتفاق عارض؟

لنفرض أن عالماً في علم الحيوان في عصر ما قبل التاريخ، تخيل خصيصة مجردة تُسمى الوزن، وأنه توقع أن له علاقة بالحجم، فجمع بعضاً من الحيوانات المختلفة، ثعبان ضخّم وثعبان صغير، دبّ ضخّم ودبّ صغير، واخترع آلة لقياس الخصيصة التي تصورها، وحين بدأ تجاربه، وجد أن وزن الثعبان الضخم هو نفسه وزن الثعبان الضئيل، وأن وزن الدب الضخم هو نفسه وزن الدب الصغير، بل الأدهى أن هذه الأوزان الأربعة متساوية، ٤.٦٦٩٢٠.١٦٠٩٠، ألا يحق له أن يظن أن هذا الرقم لا يعبر بالمرّة عن الخصيصة التي تصورها، ألا وهي الوزن، وأن المسألة تستحق إعادة التفكير؟

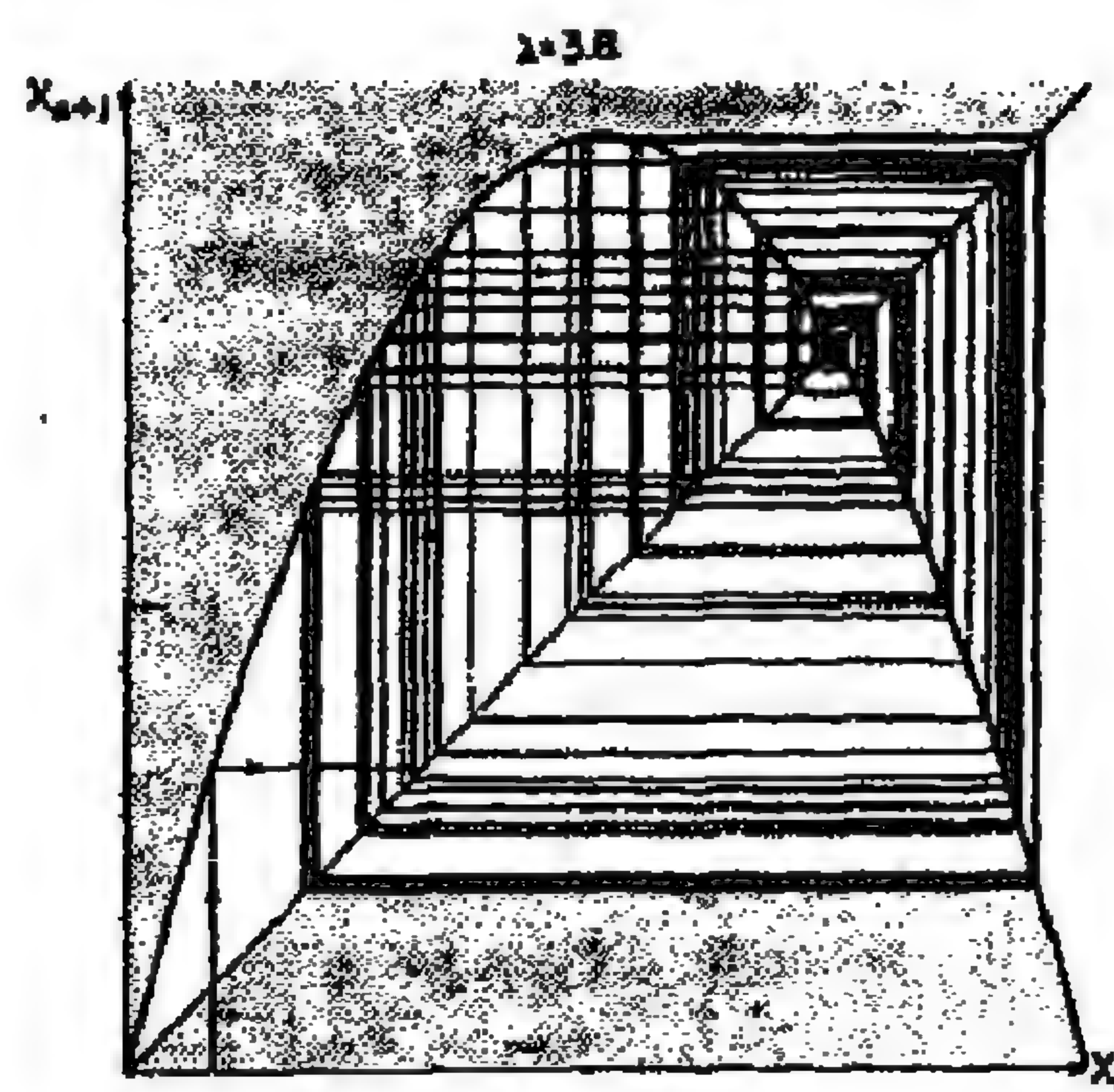
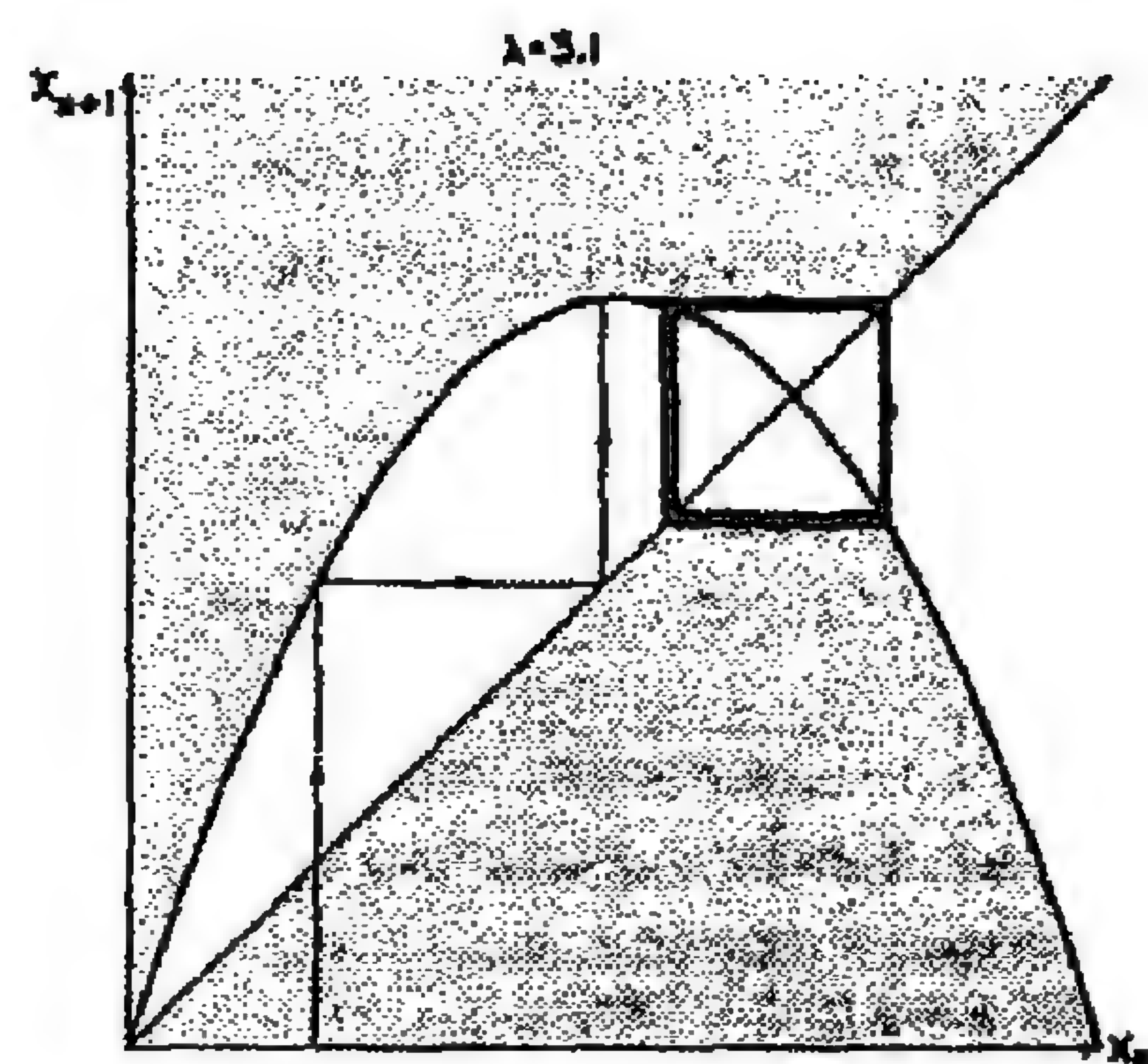
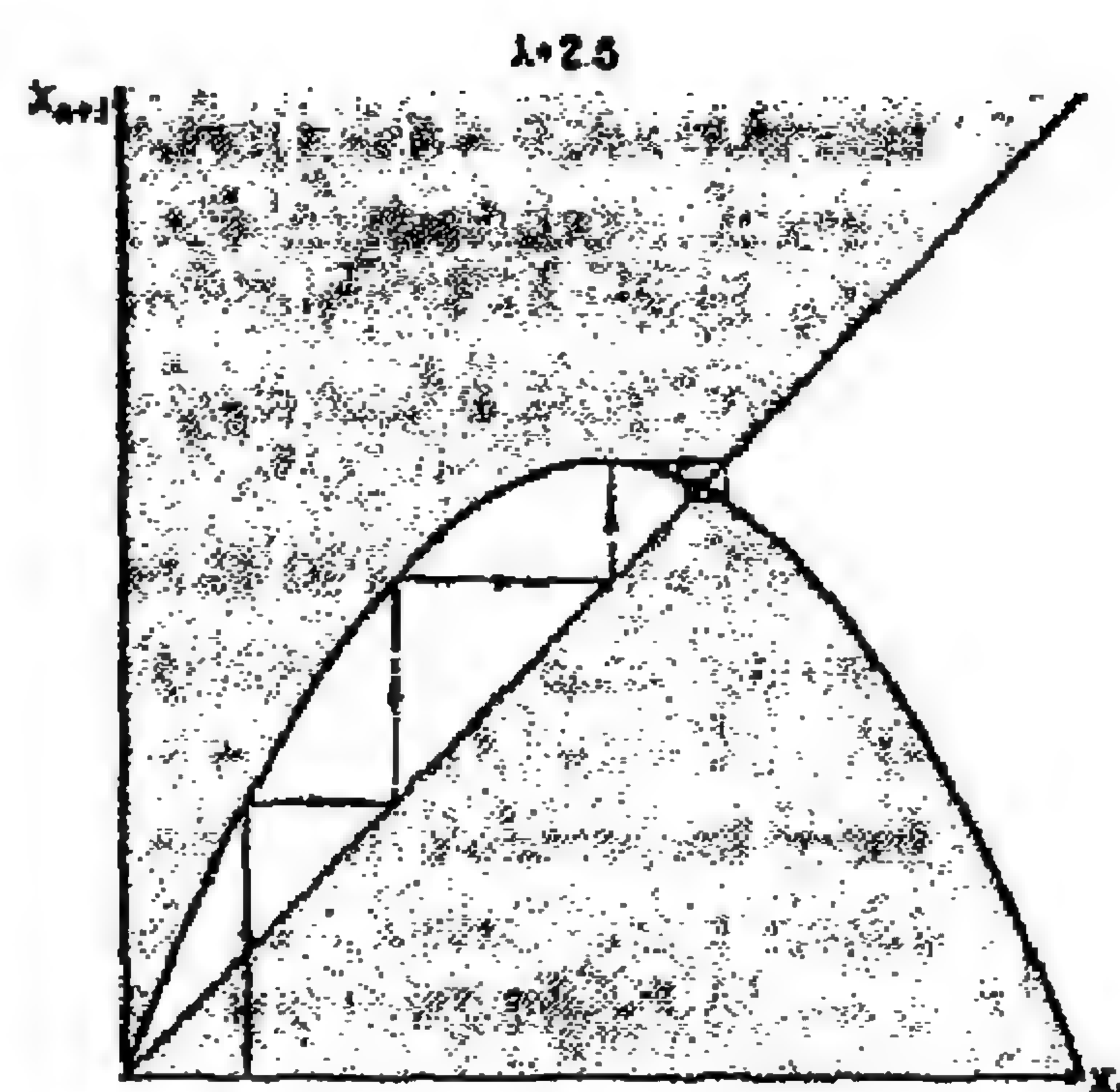
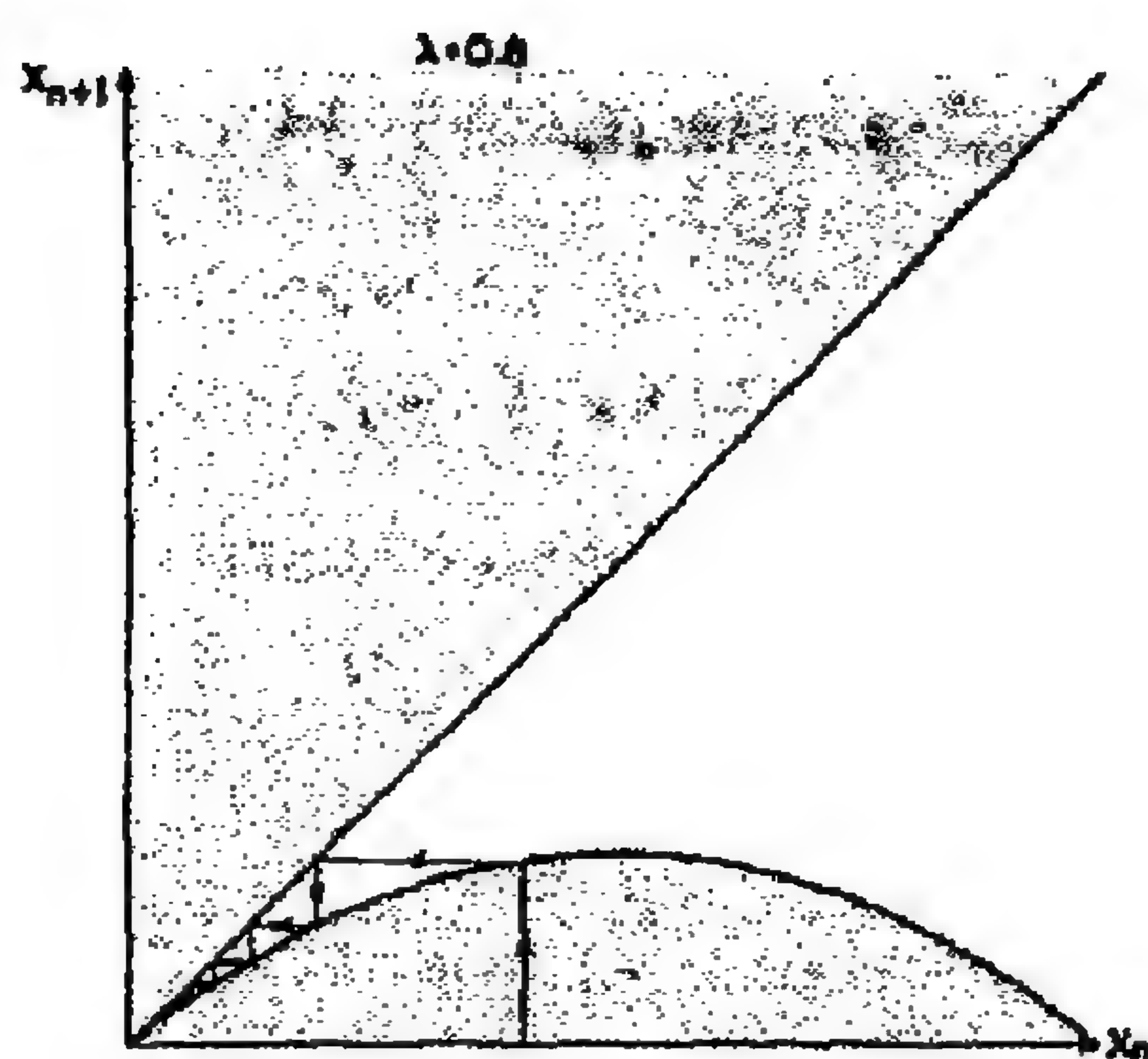
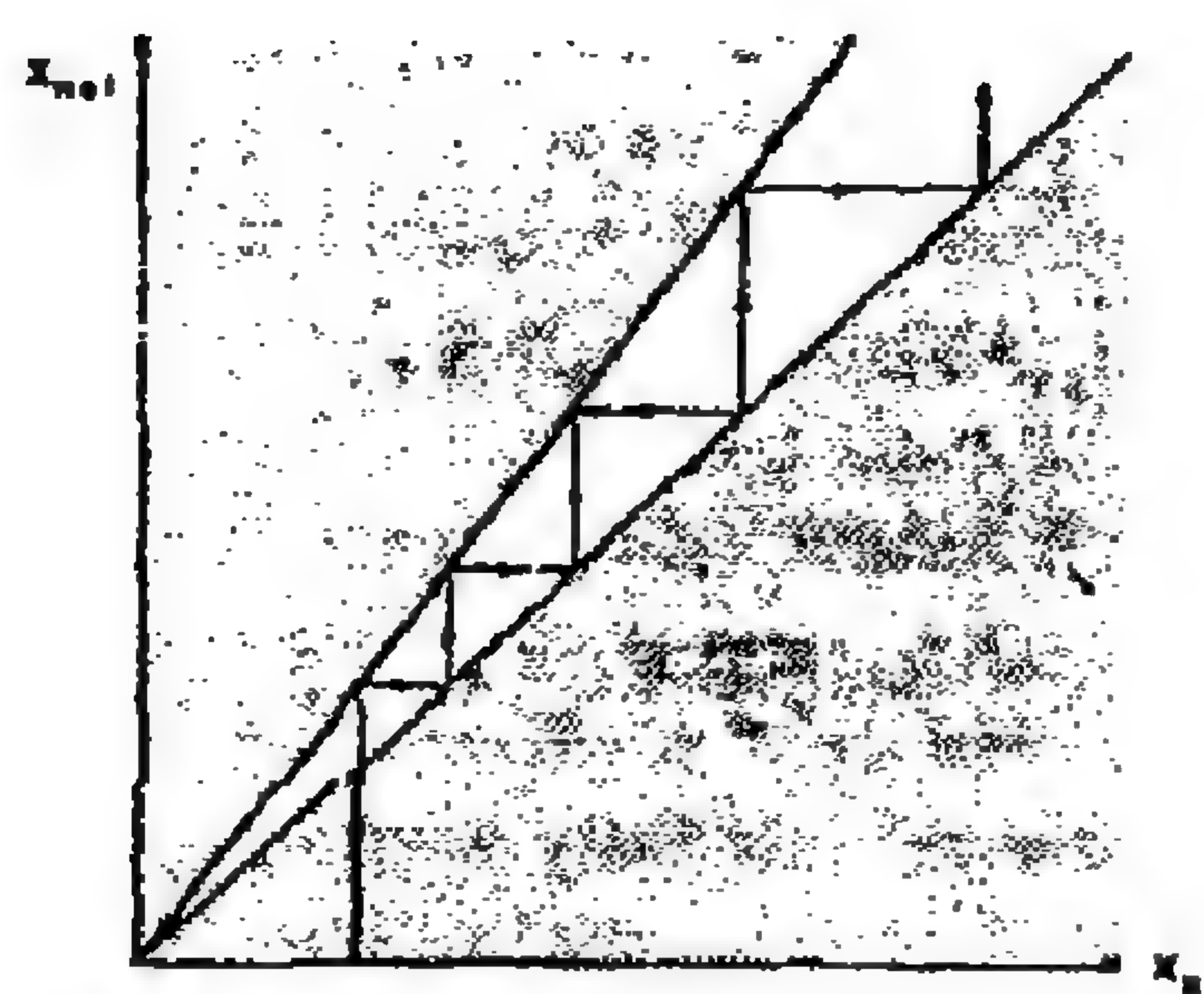
التيارات المتدفقة، والبندولات المتأرجحة، والدوائر الإلكترونية المهتزة، نظم فيزيائية مختلفة تعترىها تغيرات وهي في طريقها للهولوية، وهذه التحولات قد استعصت تماما على التحليل. إن كافة المعادلات التي تتحكم في هذه النظم معروفة تماما، ولكن الخوض فيها على المدى الطويل يبدو أمرا مستحيلا. الغريب أن هذه المعادلات أقل صعوبة بكثير عن معادلة لوجستية بسيطة وحيدة البعد. ولكن اكتشاف فايجنباوم قد بين أن نوعية المعادلات خارجة عن الموضوع، فأيا ما كانت المعادلة، فإن النتيجة واحدة.

رغم أن الارتباط بين التحليل الرقمي والفيزياء كان واهيا، إلا أن فايجنباوم قد وجد شواهد على الحاجة في التفكير في وسيلة جديدة لحساب النظم اللاخطية المعقدة. كان التكنيك المتبع إلى الآن يعتمد على تفاصيل المعادلات، فإذا كانت المعادلة جيبية، عليه أن يحسب الجيوب. ويعنى اكتشافه للعمومية أن هذا التكنيك يجب أن يتخلى عنه، إن الانتظام regularity لا علاقة له بالجيوب، ولا بالقطع المكافئة، ولا بأية معادلة معينة. ولكن لماذا؟ كان الأمر محبطا، لقد كشفت الطبيعة ستارا للحظة، معطية لمحة عن نظام ما، فما عساه يكون وراء الستار؟



حين جاء الإلهام، كان على هيئة صورة، طيف جال بالذهن لشكلين غاية في الصغر، وواحد أكبر. ذلك كل ما كان في الأمر. صورة براءة حادة محفورة في الذهن، ربما ليست أكثر من قمة مرئية لجبل جليد من العمليات الذهنية تجري تحت الستار في العقل الواعي. كانت مرتبطة بموضوع المقياسية، وأعطت فايجنباوم الطريق الذي يحتاج إليه.

كان يدرس الجاذبات. إن التوازن المستقر الذي يحصل نتيجة عمليات التطبيق mapping التي أجراها هو نقطة تجذب إليها كل الأشياء الأخرى، بصرف النظر عن "التعداد" الابتدائي، فإنه سوف يسعى متراقصا نحو الجاذب. وعند أول تضاعف للفترة، ينقسم الجاذب إلى اثنين، كمثال الخلية في انقسامها. في البداية كانت هاتان النقطتان معا من الوجهة العملية، ثم ينفصلان مع ارتفاع المعامل. ثم تضاعف تال للفترة، كل نقطة للجاذب تنقسم مرة أخرى، وفي نفس اللحظة. كان رقم فايجنباوم يرشده متى يكون التضاعف التالي. والآن اكتشف أنه يمكنه أن يستنتج أيضا القيم الحقيقية لكل نقطة على هذا الجاذب الذي يزداد تعقيدا. كان بإمكانه توقع التعداد الحقيقي الذي يحدث في فترة التردد البالغة سنتين، هنا أيضا تقارب هندسي، الأرقام أطاعت أيضا قانون المقياسية.



شكل ٦-١: بالنسبة للبيئى قد يكون أكثر المعادلات توقعاً هي معادلة خطية، تمثل نظرة مالتوس للتكاثر البيئى نمو بمعدل ثابت يسير إلى مالا نهاية (الشكل العلوى اليسار) (**)

المعادلات الأكثر واقعية ترسم خطاً منحنياً، يجعل التعداد يتردد بين ازدياد (نتيجة التكاثر) النقصان (نتيجة عوامل الافتراس مثلاً)، مثل معادلة الفروق التربيعية (اللوجستية) $ص = م س (١-س)$.

الأشكال الأربعة التالية تمثل هذه المعادلة عند قيم مختلفة للمعامل "م" (يعبر عنه في الأشكال بالحرف اليوناني لامدا). ترسم هذه المعادلة بيانياً على شكل الكأس المقلوبة (تسمى رياضياً قطع مكافئ) والتي يتغير شكلها من حيث الارتفاع والاتساع مع تغير المعامل "م". لاحظ أن الخط الأفقي يعبر عن تعداد هذا العام، والرأسى يعبر عن تعداد العام المقبل.

يسير التحليل الرقوى لهذه المعادلة بالخطوات التالية:

● نأخذ نقطة إعتباطية على المحور السينى تمثل تعداد هذا العام، نرسم خطاً عمودياً يتقاطع مع منحنى الدالة عند قيمة تمثل تعداد السنة الثانية.

● طالما أن تعداد هذا العام هو نفسه المدخل للعام المقبل، فإننا نرسم خطاً مائلاً بزاوية ٤٥ درجة. يتميز هذا الخط بأن كل نقطة عليه يكون إحداثها السينى مساو لإحداثها الصادى.

● نرسم خطاً أفقياً من النقطة التى حصلنا عليها فى الخطوة الأولى (تعداد السنة الثانية) ليقطع الخط المائل ثم نهبط بخط رأسى لمنحنى الدالة، فيكون التعداد فى السنة الثالثة.

● وهكذا من كل نقطة على منحنى الدالة نرسم خطاً أفقياً يقطع الخط المائل، ثم آخر رأسياً فنحصل على تعداد السنوات المتتالية (نفس الفكرة مطبقة مع الشكل الأعلى يسار، ولكن مع خط مستقيم وليس قطع مكافئ).

يعتمد التصرف بدرجة حساسة على المعامل "م"، على النحو التالى: (١) عند $م = ٠,٨$ يتجه الكائن تدريجياً إلى الانقراض. (٢) عند $م = ٢,٥$ يتجه الكائن إلى الاستقرار عند قيمة معينة. (٣) عند $م = ٣,١$ يحدث التفرع الثنائى، فترى الخطوط تدور فى مربعين. المفروض أنه بزيادة المعامل عن ذلك يحدث تفرع آخر، حيث تدور الخطوط فى أربعة مربعات، وهكذا. (٤) عند المعامل $٣,٨$ تظهر حالة الهىولية، فتصنع الخطوط مربعات تتغير فى أحجامها بالزيادة والنقصان بدون أن تستقر على حالة معينة.

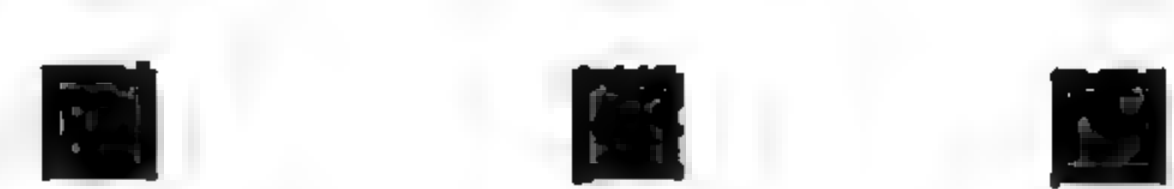
كان فايجنباوم يستكشف أرضاً مجهولة، منطقة متوسطة بين الرياضيات والفيزياء، وكان عمله من الصعب تصنيفه. لم يكن رياضيات، فهو لم يكن يثبت شيئاً ما. كان يدرس الأرقام، والأرقام هي حقا أساسية في الرياضيات، ولكنها في ذلك مثل قطع العملة لرجل الاستثمار، هامة، ولكن ليس فيها ما يشغل ذهنه حولها. إن الأفكار هي السلعة الأساسية للرياضيات، وقد كان فايجنباوم يبحث في الفيزياء، ولكنها، وهنا ممكن الغرابة، كانت نوعاً خاصاً من فيزياء تجريبية.

الأرقام والمعادلات كانا مادة دراسته، بدلاً من الإلكترونات والكواركات. كانت لهما منحنيات ومسارات، وكان يريد أن يستكشف تصرفاتهما. كان الحاسوب هو عمله، وبالإضافة إلى نظريته، كان يؤسس أسلوباً في العمل. الأسلوب العادي في التعامل أن المستخدم يضع مسألة، يغذي بها الحاسوب، ثم ينتظر النتيجة. لكل مسألة واحدة، نتيجة واحدة. وقد كان فايجنباوم وباحثو الهيولية الذين تبعوه يحتاجون المزيد. إنهم يريدون عمل ما عمله لورنز من قبل، أن يصنعوا عوالم مصغرة ويشاهدوها تتطور على شاشة الحاسوب، ثم يغيروا في هذا المعامل أو ذاك، ويروا الأثر المترتب على ذلك. كان اقتناعهم هو أن تأثيرات طفيفة يمكن أن تتمخض عنها آثار جسام.

وشعر فايجنباوم بمدى عجز قدرة الحاسوب في لوس ألاموس عن الوفاء بمتطلباته. كان مُقدراً له أن ينتظر مدة قبل أن يحصل على حاسوب مكتبي يصل ثمنه إلى ٢٠ ألف دولار يخصص لأبحاثه، أما في ذلك الوقت فقد كان الحاسوب متاح من النوع المركزي متعدد المستخدمين، له عدة طرفيات يستخدم هو واحدة منها، فكانت طريقة العمل أن يرسل عبر أسلاك التوصيل العملية التي يريد، وينتظر حتى يفرغ له الحاسوب ويخرج له النتيجة. وبالنسبة للمخرجات الرسومية كانت الوسيلة العتيقة التي هي إخراج حروف مثل \times أو $+$ لتمثيل الأشكال المطلوبة.

وبينما كان يجري حساباته، كان يفكر، أية رياضة حديثة تصلح لإنتاج أنماط المقياسية المتعددة التي يريد أن يشاهدها. لقد أدرك أن شيئاً ما في تلك المعادلات يجب أن يتمتع بخصيصة "المعاودة recursion"، أي بمرجعية ذاتية self-referential، تصرف واحد يسترشد بتصرف آخر كامن بداخله. الصورة المهزوزة التي جالت بخاطره في لحظة الإلهام كانت تعبر عن شيء ما متعلق بطريقة من معالجة مقياسية لدالة لكي تتماشى مع دالة أخرى. لقد جرب أسلوب إعادة الاستنظام، والذي يتيح التخلص من اللانهايات.

وفى صيف ١٩٧٦ اندفع يعمل كالمحموم كما لم يفعل طوال حياته. كان يركز تفكيره كما لو كان ممسوسا، يضع البرامج ويشغلها ويبرمج من جديد، دون أن يحاول طلب معاونة من قسم البرمجة، لأن ذلك سيعنى فصل نفسه عن الحاسوب لاستخدام الهاتف، وبالتالي لا يدرى متى يتاح له مرة أخرى. وعلى أية حال فقد كان يواجه بفصل الحاسوب عنه بين الحين والآخر، تاركاً إياه يغلى غيظاً وكمداً. أخذ يعمل لشهرين بمعدل اثنتين وعشرين ساعة يومياً، يخلد إلى النوم بعقل هائج بالأفكار، ويصحو ليجد فكره فى نفس النقطة التى كانت قبل نومه. لم يزد غذاؤه عن فناجين القهوة (كان غذاؤه أصلاً لا يزيد عن أكثر اللحوم خلوا من الدهون، والقهوة، حتى أن أقرانه كانوا يتندرون بأنه يحصل على حاجته من الفيتامينات من سيجارته) وتطلب الأمر أخيراً تدخلاً طبياً، ولكن وقتها كان قد توصل إلى نظرية شاملة، ٣

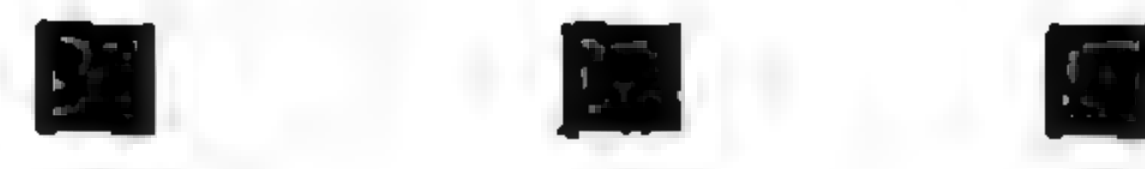


العمومية تصنع الفرق بين الجميل والمفيد. فالرياضيون، بعد حد معين، لا يعينهم تقديم آليات لإجراء الحسابات، والفيزيائيون، بعد حد معين، يحتاجون للأرقام. ونظرية العمومية universality تقدم أملاً أنه بحل المسائل البسيطة فى الفيزياء يمكن حل المسائل الأكثر تعقيداً، إذ تكون الإجابة متماثلة. والأكثر من ذلك، فإنه بوضع نظريته فى إطار إعادة الاستنظام، فقد أعطاها فايجنباوم ثوباً يجعل الفيزيائيين يعتبرونها وسيلة لإجراء الحسابات، تقريبا شيئاً قياسياً.

ولكن الشيء الذى جعل نظرية العمومية ذات فائدة كان صعباً على الفيزيائيين الاعتقاد به. فهى تعنى أن النظم المختلفة يمكن أن تتصرف بطريقة متشابهة. طبعاً كان فايجنباوم يدرس معادلات رقمية بسيطة، ولكنه كان يعتقد أن هذه النظرية تعبر عن قانون شامل يحكم كافة التحولات من الانتظام إلى الاضطراب. فكل إنسان يعلم أن الاضطراب يعنى كمّاً من الترددات المختلفة، وكل إنسان يتعجب من أين أتت هذه الترددات. إن المضمون الفيزيائى هو أن النظم الواقعية تتصرف بطريقة متشابهة، بل ونتائج قياساتها متشابهة. فنظرية العمومية لفايجنباوم ليست وصفية فقط، بل وكمية أيضاً. لا تتضمن أشكالاً فقط، بل أرقاماً أيضاً. بالنسبة للفيزيائيين، يشق ذلك على تصوراتهم.

وظل فايجنباوم يحتفظ بخطابات الرفض لسنوات عديدة فى درج مكتبه. كان عمله فى لوس ألاموس قد جرّ عليه شهرة ومالاً، ولكن الأمر اقتضى عامين من الرفض من محررى المجالات العلمية منذ أن بدأ يرأسها. إن حقيقة أن الاكتشافات العلمية الرائعة

وغير المتوقعة تُرفض عند محاولة نشرها تبدو أسطورة سخيفة. فالعلم الحديث، بكم المعلومات الهائل الذى يحتويه وطرقه التجريبية، لا يجب أن يكون مجال تذوق خاص. وقد اعترف رئيس تحرير بعد ذلك بأعوام أنه قد رفض بحثاً يمثل نقطة انقلاب فى المجال، ولكنه كان على رأيه فى أن البحث لم يكن ليقابل تذوق قرأه من الرياضيين التطبيقيين. وأثناء ذلك، حتى بدون بحث، كان اكتشاف فايجنباوم المذهل قد أصبح بمثابة الخبر الصاعقة لدى دوائر معينة فى الرياضيات والفيزياء. فالمضمون الأساسى للنظرية كان يذاع بالطرق التى تذاغ بها أغلب الآراء العلمية الآن، من خلال المحاضرات والمراسلات. كان فايجنباوم يعلن عن نظريته خلال المؤتمرات، ويطلب منه نسخ منها، بالعشرات فى البداية، ثم بالملئات.



هناك افتراض فى نطاق العلم بشيوع المعلومات العلمية، بحيث إنه ما أن يحدث اكتشاف جديد حتى يكون معلوماً للكافة على الفور. وبذلك يُبنى كل كشف وكل فكرة جديدة على الحصيلة العلمية القائمة، وهكذا يبنى العلم كما تُشيد المباني، حجراً بعد حجر.

وتصلح هذه الفكرة فى حالة وجود معضلة محدّدة تحديداً دقيقاً، فى مجال علمى عالى التنظيم. فحين اكتُشف التركيب الجزيء لك د.ن.أ. مثلاً، تقبله الجميع بقبول حسن. ولكن الأمور لا تسير دائماً هذا السير للأفكار الجديدة، فحين بدأ ظهور علم اللاخطية مشرّداً فى أركان من مجالات مختلفة، لم يحظ بهذا الطريق الممهد للانتشار والذيع. وحين بزغت الهولوية كمضمون متكامل، لم تكن قصتها فقط قصة الأفكار والاكتشافات الحديثة، بل أيضاً فهماً تأخر أوانه لأفكار قديمة دخلت طى النسيان، لماكسويل وبوانكاريه، بل وأينشتاين أيضاً. فأجزاء كثيرة منها لم تُفهم إلا من كل عالم فى مجاله، الجانب الرياضى بواسطة الرياضيين، والجانب الفيزيائى بواسطة الفيزيائيين، أما الجانب المتصل بعلم الطبيعة الجوية فلم يفهمه أحد. إن شيوع الأفكار أصبح هاماً بقدر أهمية إبداعها.

كل عالم له مجموعته الخاصة من المريدن، ومجاله الخاص من الفكر، ومن ثم فكانت الصورة لديه قاصرة بالضرورة. فالعلماء منازون بطبيعتهم تأثراً بتقاليد مجالهم أو بأسلوب تعليمهم. ليس من رابط يجمع الجميع، عدا محاولات فردية محدودة الأهداف والأثر.

فإلى أواخر السبعينات، وفى خضم الأبحاث والاكتشافات، لم يكن اثنان من الرياضيين يفهمون الهولوية بنفس الطريقة، فأولئك المنتمون إلى النظم غير التشتمية

(المحافظة conservative) دون احتكاك أو تشتت للطاقة يعتبرون أنفسهم مرتبطين بالروس من أمثال كولموجوروف Kolmogorov وأرنولد Arnold، والمنتظمون إلى النظم الديناميكية بسوانكويه وبركهوف وسميل، والبيولوجيون إلى سميل وماي ويورك، والجيولوجيون وعلماء المعادن لماندلبروت، وتتوالى التجمعات بلا حصر، بينما قد لا يكون عالم في البصريات قد سمع بالاسم أساسا.

وكان قدر فايجنباوم أن يخوض طريقا خاصا من الكفاح. في مرحلة بزوغ شهرته، اتهمه البعض أن مجال عمله ضيق للغاية، جميل بلا شك، ولكن ليس في اتساع عمل يورك مثلا. وقد تعرض للمز ذات مرة من ماندلبروت عام ١٩٨٤، في حفلة تسليم جائزة نوبل دُعي فيها فايجنباوم لإلقاء كلمة الحفل، فيما وُصف بأنه "محاضرة مضادة لفايجنباوم". لقد نبش بطريقة ما عن ورقة نُشرت منذ اثنين وعشرين عاما عن تضاعف الفترات، كتبها عالم فنلندي يدعى مايرج Myberg، وظل يردد تسمية هذه الظاهرة بظاهرة مايرج، متجاهلا عمل فايجنباوم في الموضوع.

ولكن فايجنباوم اكتشف العمومية، ووضع نظرية تفسرها، وأصبحت الركاز للعلم الجديد. وحين عزّ عليه نشرها في المجلات العلمية، قام بنشرها بنفسه في المؤتمرات واللقاءات العلمية. وقوبل اكتشاف النظرية بالإعجاب، وعدم التصديق، والانبهار. فكما فكر عالم في اللاخطية، زاد شعوره بقوة عمومية فايجنباوم. لقد عبر عن ذلك أحدهم بكل بساطة قائلا: "كان كشفا سعيدا ومثيرا للغاية، أن توجد هياكل في النظم اللاخطية، متماثلة على الدوام لو نظرت لها على الوجه الصحيح". والتقط بعض العلماء ليس الفكرة فقط، بل التكنيك أيضا، فالعب بهذه الخرائط، مجرد اللعب، كان يثير في أنفسهم الانفعالات. فبالأتم الحاسبة، استطاعوا أن يعيشوا حالات الاندهاش والرضا التي مكّنت فايجنباوم من الاستمرار في لوس ألأموس. ومنهم من ساهم في تنقيح النظرية ومدّ نطاقها، منهم بریدراج سفتنوفيك Predrag Cvitnovic عالم الجسيمات، في حين أنه بين أقرانه لم يفصح لهم عما كان يعمل، مدّعا أنه كان فقط يقتل الوقت.

كما لاقت النظرية تحفظاً من الرياضيين، بقدر كبير بسبب أن فايجنباوم لم يقدم برهانا قويا. وفي الواقع لم تحظ النظرية بالبرهان الرياضي إلا بحلول عام ١٩٧٩، في أعمال أوسكار لانفورد الثالث Oscar Lanford III. يتذكر فايجنباوم دائما قصة محاضرة ألقاها في لوس ألأموس أمام صفوة من العلماء، حيث لم يكذب يدا محاضرتة حتى هبّ الرياضي الشهير مارك كاك Mark Kac قائلا: "سيدى، هل أنت بصدد تقديم تحليل رقمى أم برهان؟"

ورد فايجنباوم بأن ذلك متروك لتقدير المستمعين، وبعد إنهاء محاضراته سأل كاك عن رأيه، فأجاب: "نعم، إنه حقاً لبرهان معقول، ولنترك التفاصيل للرياضيين."

ودبت الحركة، وكان لاكتشاف العمومية دور القيادة فيها. في صيف ١٩٧٧ نظم الفيزيائيان جوزيف فورد Joseph Ford وجوليو كازاتي Giulio Casati أول مؤتمر عن علم جديد يسمى الهولوية، في فيلا أنيقة ببلدة كومو Como بإيطاليا. وحضر حوالي مائة عالم، أغلبهم من الفيزيائيين. وعقب فورد قائلاً: "لقد رأى ميشيل العمومية واكتشف كيف تتصرف بطريقة مقياسية واستتبط طريقة للتحويل إلى الهولوية تطلب اللب بحق. لقد كانت المرة الأولى التي نحصل فيها على نموذج واضح يمكن لأي إنسان أن يفهمه."

لقد كانت من الأشياء التي أن أوانها. كان الناس في مجالات مختلفة، من علم الحيوان إلى الفلك، يفعلون نفس الشيء، وينشرون في مجلاتهم التخصصية المحدودة الانتشار، غير منتبهين لأعمال غيرهم في نفس الموضوع، ويُنظر إليهم من أقرانهم على أنهم من غريبى الأطوار. لقد كادوا يكون فرحاً حين اجتمع شملهم أخيراً."

i أسلوب رياضي يهدف إلى إزالة نقاط الشذوذ وعدم الاتصال في المعادلات الرياضية-المترجم

(*) التحليل الرقمي للمعادلة $m = s$ الواردة في الفصل الثالث. المترجم

ii النتائج التي حصل عليها من الحاسوب هي الخرائط هي التي سبق الحديث عنها في الفصل الثالث، والتي تسمى أشكال فايجنباوم (راجع شكل ١-٢ و ٢-٣). المترجم

iii كان الفائزان بالجائزة هما كارلو روبيا Carlo Rubbia وسيمون فان در مير Simon Van Der Meer عن اكتشاف الجسيمات الحاملين للقوة النووية الضعيفة والمسمى W, Z. المترجم

بدء الاضطراب

كان ألبرت لبشابر Albert Libchaber مثاراً للدهشة والإعجاب في مدرسة الإيكول نورمال سوبريور، والتي تقبع هي والإيكول بوليتكنيك على قمة النظام التعليمي بفرنسا، بفضل ما وهب من نضج مبكر. وسرعان ما صنع لنفسه اسماً متميزاً في فيزياء الحرارة المنخفضة، ودراسة تصرفات الهليوم فائق السيولة على ضوء النظرية الكمية، وذلك عند درجات حرارة لا تبعد عن الصفر المطلق إلا بقدر أنملة. على أنه بدأ عام ١٩٧٧ وكأنه يضيع وقته وموارد الكلية في تجربة تبدو تافهة، حتى أنه هو نفسه كان يتساعل عن جدواها. وخشية منه أن تضر هذه التجربة بمستقبل طلاب الدراسات العليا، فإنه لم يطلب أحداً منهم لمشاركته فيها، واستخدم مهندسا متخصصا بدلاً من ذلك.

قبل خمس سنوات من غزو الألمان لباريس، ولد لبشابر لأبوين بولنديين يهوديين، وجدٌ حاخام. وقد نجا من ويلات الحرب بنفس الطريقة التي نجا بها ماندلبروت، بالاختفاء في المناطق الريفية، منفصلاً عن والديه اللذين اختفيا في مكانٍ آخر. وقد كان إنقاذ حياته بفضل شهامة أحد رؤساء الاستخبارات الفرنسية، وقد رد له الجميل حين شهد لصالحه في المحاكمات التي تلت الحرب لأعوان النازي، وكانت لشهادته أثر في إنقاذ منقذه، وهو آنذاك في العاشرة من عمره.

وسريعا ما خط سلكه العلمي في الحياة الأكاديمية الفرنسية، فلم يكن نبوغه موضع شك على الإطلاق، وكان هوسه بالقراءة موضع تندر، فقد كان يقتني المئات من الطباعات الأصلية لكتب علمية، يرجع تاريخ البعض منها إلى القرن السابع عشر، لم يكن يقرأها كتاريخ للعلوم، بل كمنجم للأفكار العلمية عن حقيقة الطبيعة، نفس الحقيقة التي كان يسبر غورها عن طريق أجهزة الليزر وملفات التبريد الفائقة عالية التقنية.

وقد وجد في المهندس الذي اختاره لمساعدته روحاً متوافقة. كان يدعى جين موريه Jean Maurer، فرنسي لا يعمل إلا بما يحس به. بدأ الاثنان يصممان تجربة تهدف إلى الكشف عن بدء الاضطراب.

كان لبشابر كتجريبي معروفاً بذهن وقاد، وتفضيل للقوة الذهنية على القوة العضلية، عزوفاً عن الحسابات المعقدة والتقنيات المغالى فيها. كانت فكرته عن التجربة الجيدة كفكرة الرياضيين عن البرهان الجيد، الإيجاز مع الجمال، لقد كان يعطى الجمال حقه من التقدير بقدر ما يعطى للنتائج.

كانت تجربته من الصغر لدرجة أنه يحملها فى صندوق للثقاب حين يحلو له أن يطوف بها على أقرانه، كقطعة من الفن الرفيع. كان يسميها "الهليوم فى صندوق صغير"، فلم يكن قلب التجربة يزيد عن بذرة ثمرة الليمون، خلية مصنوعة بعناية فائقة من الصلب المقاوم للصدأ، ممثلة بالهليوم فى درجة حرارة أربعة درجات مطلقة.

كان المعمل يشغل الدور الثانى من مبنى الإيكول نورمال بباريس، على بعد مئات قليلة من الأقدام من معمل لويس باستير القديم. وكشأن كافة المعامل الفيزيائية الجيدة متعددة الأغراض، كان فى حالة من الفوضى الشاملة، من أدوات يدوية مبعثرة هنا وهناك وقطع من البلاستيك والمعدن فى كل مكان. ووسط هذه الفوضى كان الجهاز الذى يضم الخلية الضئيلة المحتوية على السائل عملياً بقدر كبير، أسفله صفيحة من نحاس غاية فى النقاء، وفوقه رقيقة من بلورة السفير. كانت المواد تُختار طبقاً لخصائص توصيلها للحرارة. كان الجهاز يحتوى على ملف حرارى صغير، وحشية من مادة التفلون. وكان الهليوم يغذى من خزان، لم يزد هو نفسه عن نصف بوصة مكعبة حجماً. والنظام ككل داخل وعاء مفرغ من الهواء بدرجة كبيرة. والوعاء بدوره مغمور فى نيتروجين سائل، لتحقيق توازن درجة الحرارة.

كان لبشابر قلقاً على الدوام من جهة الاهتزازات. فالتجارب، مثلها فى ذلك مثل النظم اللاخطية الواقعية، تجرى عادة بخلفية من الشوشرة تفسد القياسات وتشوه البيانات. وفى تجربة مثل تجربته التى صممها لتكون على أعلى درجة من الحساسية يمكن للتشويش أن يؤثر عليها بدرجة كبيرة، فيغير من نمط التصرف إلى نمط آخر. على أن اللاخطية، كما تحل بتوازن النظم، يمكن أيضاً أن تساعد فى توازنها. فالتغذية الخلفية اللاخطية يمكن أن تجعل الحركة أكثر استقراراً. وفى النظم الخطية يكون للاضطراب تأثير وحيد، ولكن فى النظم اللاخطية يمكن أن يعود الاضطراب ليلاشى أثر الاضطراب الأول، فيكون النظام متوازناً ألياً. وكان لبشابر يعتقد أن النظم البيولوجية تستخدم لخطيتها للدفاع عن نفسها ضد التشويش، فى نقل الطاقة بواسطة البروتين، وفى الحركة الموجية لكهرباء القلب، والجهاز العصبى، كلها حافظت على فعالية أدائها فى وسط مشوش. وكان لبشابر يأمل فى يكون الهيكل التحتى للتدفق، مهما كانت طبيعته، من الاستقرار بحيث يمكن لتجربته أن تكشف عنه.

وكانت خطته أن ينتج تيارات حمل بجعل أسفل الخلية أكثر حرارة من أعلاها. كان هذا يماثل بالضبط نموذج تيارات الحمل الذي وصفه لورنز، وهو النظام الكلاسيكي لتيارات الحمل المعروف باسم رايلي-برنارد Rayleigh-Benard. لم يكن الأوان قد حان لسمع لبشابر عن لورنز، كما لم يكن لديه أدنى فكرة عن نظرية فايجنباوم. ففي ١٩٧٧ كان فايجنباوم قد بدأ سلسلة محاضراته، ولم يكن لاكتشافاته أثرها إلا لدى القادرين على فهمها. ولكن ما كان بإمكان غالب الفيزيائيين قوله، هو إن أنماط وأشكال فايجنباوم المنتظمة لم تكن تحمل أية علاقة واضحة بالنظم الواقعية، فهي لم تتبع إلا من ثنايا آله الحاسبة، أما النظم الفيزيائية فأعقد من ذلك بكثير. وأقصى ما يمكن لأحد قوله هو أنه قد اكتشف شيئاً من التماثل الرياضي ببدء الاضطرابات.

كان لبشابر يعلم أن التجارب الحديثة أضعفت من فكرة لاندو عن بدء الاضطرابات، ببيان أنها تبدأ فجائية، بدلا من تكديس متواصل للترددات، وأن نظرية جديدة يجب أن توضع، وكان يأمل أن تعطى هذه الهبة من السائل صورة تحمل أكبر قدر من التفصيل حول بدء الاضطرابات.



إن النظرة الضيقة يفترض أنها في صالح العلم. فمن وجهة نظر علماء ديناميكا الموائع هم على حق في الشك في درجة الدقة العالية التي ادّعاها سويني وجولوب في أبحاثهم. وبناء على هذه النظرة، كان الرياضيون على حق في مقاومة رول لكسره القواعد. لقد وضع نظرية فيزيائية طموحة مختبئة تحت ستار من عبارات رياضية محكمة، فجعل من العسير الفصل بين ما افترضه وما أثبتته. إن الرياضي الذي يرفض الاعتراف بفكرة إلا أن تكون على صورة: نظرية، إثبات، نظرية، إثبات، يلعب دوراً أملت عليه قواعد مجالته العلمي؛ وسواء عن وعي غير وعي، فإنه يقف حارساً ضدّ التزوير والغموض. والمحرم العلمي الذي يرفض الأفكار الجديدة بسبب أنها مصاغة بأسلوب غير مألوف يبدو وكأنه يقف يلعب نفس الدور للعلم نيابة عن أهله، ولكنه أيضا له دور يلعبه بحجة الحذر مما لم يتم تجربته. وحين كان زملاء لبشابر يطلقون عليه "الغامض"، لم يكن ذلك على سبيل الدعاية.

كان مجرباً يتميز بالمهارة والانضباط، ودقته في سبر أغوار المادة، ومع ذلك فقد كان يُكن شعوراً تجاه الشيء المجرد صعب التحديد، المسمى "التدفق". فالتدفق شكل مضاف إليه تغير، حركة مضاف إليها هيئة. فالفيزيائي حين يتصور نظاماً من

معادلات تفاضلية سوف يسمى حركتها الرياضية تدفقا. إن التدفق فكرة أفلاطونية، تفترض أن التغير في النظم يعكس حقيقة ما، مستقلة عن لحظة معينة. وقد اعتنق لبشابر فكرة أفلاطون بأن الكون مليء بالأشكال المختلفة. "ألست حين تنظر لأوراق الشجر، تحس أن الأشكال الأولية محدودة؟ بإمكانك رسم الشكل الأساسي بسهولة. قد يكون مثيرا لك أن تحاول فهم ذلك. لقد رأيت ذلك في تجارب لسوائل متداخلة في بعضها البعض" كان على مكتبه صور مبعثرة لمثل هذه التجارب، أسطوانات من سوائل على هيئة أشكال ماندلبروت الفراكتالية. "والآن، حين تشعل الغاز في مطبخك، ترى اللهب يتخذ أشكالا أيضا. إنه شيء غاية في الاتساع، شيء شامل. إنني لا أهتم إن كان لهبا يشتعل أو سائلا في سائل أو جسما صلبا يتبلور، إن ما يهمنى هو هذا الشكل.

منذ القرن السابع عشر وهناك تصور من نوع ما أن العلم يفتقد تطور الأشكال في الفراغ وتطورها في الزمن. يمكنك أن تفكر في التدفق بعدة طرق، تدفق في الاقتصاد أو تدفق في التاريخ، يمكن في البداية أن يسير خطيا، ثم يتفرع إلى حالة أكثر تعقيدا، ربما مع اهتزاز دوري oscillation، بعد ذلك، قد يصير هيويا

عمومية الأشكال، التماثل عبر المقاييس، قدرة العودة لتدفق داخل تدفق، مفاهيم تخرج تماما عن نطاق أسلوب معالجة التغير عن طريق المعادلات التفاضلية. إلا أن ذلك لم يكن سهلا رؤيته. فالمسائل العلمية تصاغ باللغة العلمية المتاحة. وحين بدأ لبشابر وبعض من المجريين الآخرين النظر في حركة السوائل، فإنهم قاموا بذلك بروح الشعراء أكثر من روح العلماء، حين أحسوا بوجود رابطة بين الحركة والأشكال الأولية عامة الوجود. كانوا يحصلون على البيانات بالطريقة الوحيدة المتاحة لديهم، كتابة الأرقام أو تسجيلها على الحاسوب، ثم يبدعون في البحث عن طريقة لتنظيمها كيما تظهر على هيئة تلك الأشكال. كانوا يأملون في التعبير عنها بمعلومية الحركة، مقتنعين أن الأشكال الديناميكية مثل اللهب والأشكال العضوية مثل أوراق الشجر تستمد أشكالها من تموج لم يفهم بعد للقوى. وقد نجح من تجاربهم ما تابعوا فيها الهولية بكل جدية، بفضل رفض أية حقيقة يمكن أن تجمد بلا حراك.



كان جوته مصدر إلهام للبشابر، كما كان بالنسبة لفايجنياوم. وبينما كان الأخير ينقب في مكتبة جامعة هارفارد عن "نظرية الألوان Theory of colors" لجوته، كان الأول قد تمكن بالفعل من أن يضم لمكتبته النسخة الأصلية من المقال الأكثر غموضا

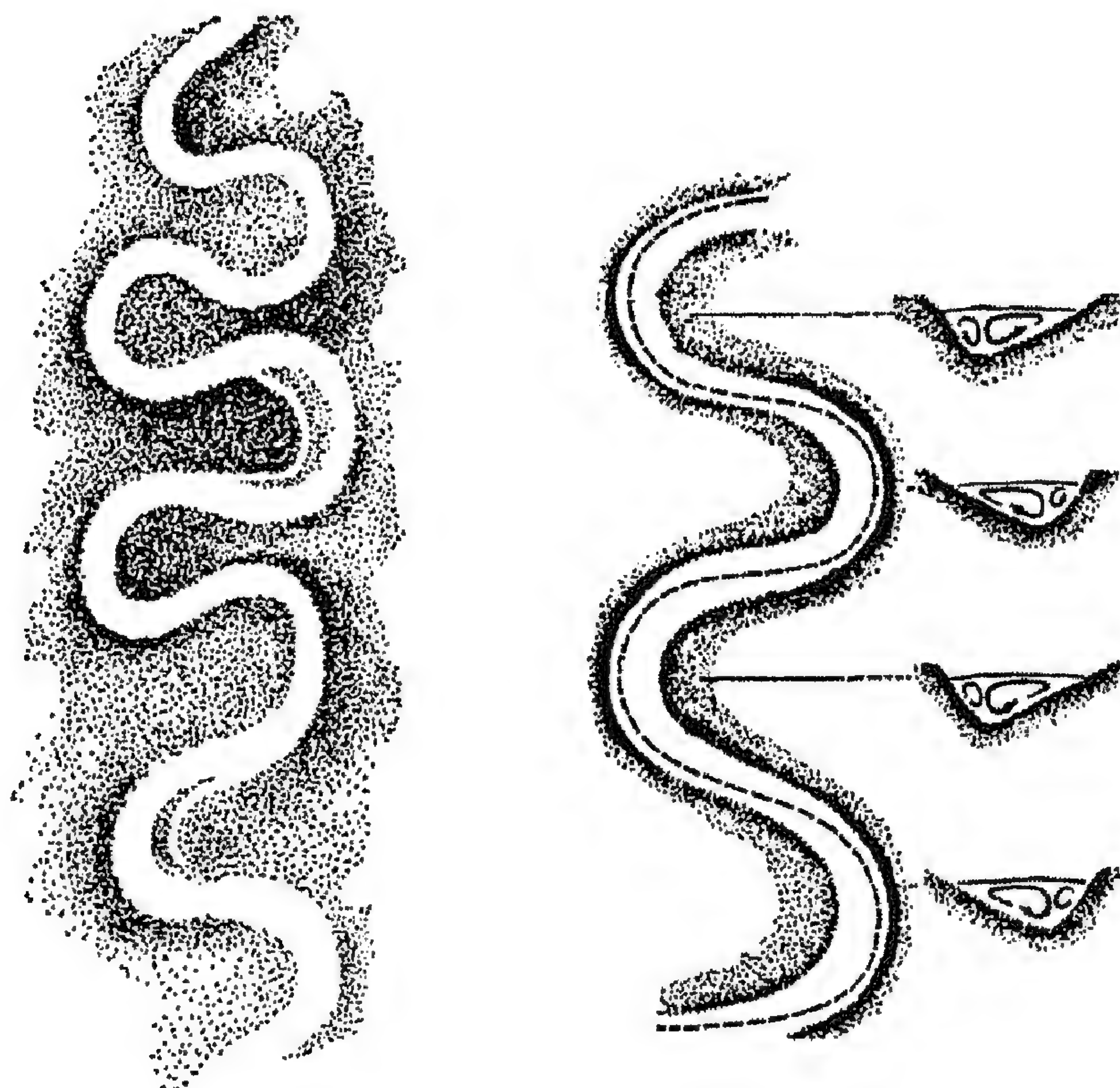
"التحول فى النباتات *On the transformation of plants*"، والذي مثل هجوما غير مباشر على الفيزيائيين الذين كان يتهمهم جوته بالتركيز المطلق على الجانب الاستاتيكي من الظواهر، دون القوى الحيوية والتدفقات التى تصنع الأشكال التى نراها فى الطبيعة بين لحظة وأخرى. وكان جزء من تراث جوته شبه العلمى لا يزال حيا فى ألمانيا وسويسرا، بواسطة فلاسفة مثل رودولف شتاينر Rudolf Steiner وتيودور شفنك Theodor Schwenk. وكانا أيضا محط إعجاب بالغ من لبشابر.

كان التعبير الذى استخدمه شفنك عن علاقة القوى بالأشكال هو "الفوضوية" الحساسة *Das sensible Chaos* استخدمه كعنوان لكتاب صغير طبع عام ١٩٦٥، وسرعان ما تعددت طبعاته بعد ذلك. كان الكتاب عن المياه فى المقام الأول، وقد حظى بتقدمة وتقريظ من مجلة متخصصة فى هندسة المياه. لم يكن يشوب العرض إلا النذر اليسير من العلم، وليس من رياضيات على الإطلاق. يحوى نظرات لفنان لا تخطئها العين، فقد جمع فيه كما هائلا من الصور والمخططات أشبه بما يخطه عالم بيولوجيا حين يرى خلية تحت مجهره لأول مرة. كان يتمتع بعقلية منفتحة، وسذاجة طفولية تدعو جوته للفخر.

تملأ التدفقات صفحات الكتاب، أنهار عظمى كالميسيسيبي تتمعج وتتلوى وهى فى طريقها إلى البحر، وعنده تصنع دوامات وتتأرجح يمنا ويسرة. لم يكن شفنك يؤمن بالصدف البحتة، بل بالمبادئ العامة، وأكثر من العمومية، كان يؤمن بروح للطبيعة جعلت كتابه مليئا بالتجسيد، فالتيار "ينزع إلى تحقيق ذاته بصرف النظر عما حوله من عقبات".

كان يعلم بوجود تيارات ثانوية خلال التيار الأصلي، مياه تتحرك تحت تدفقات النهر، وحول محوره، وهبوطا إلى قاعه، وارتفاعا إلى سطحه، ويمنا ويسرة فى اتجاه شواطئه. كان لدى شفنك خيال طوبولوجى لمثل هذه الأنماط "إن هذه الصورة لجداول ملتفة معا فى شكل حلزوني صحيحة فقط فيما يتعلق بالحركة الظاهرية، ولكنها ليست فى الواقع جداول منفردة، بل أسطح كاملة تتدافع وتلتف فى الفراغ حول بعضها البعض." كان يرى الموجات تتصارع وتتسابق، تقسم الأسطح والحدود بين الطبقات. ويفهم الدوامات على أنها دوران لسطح حول الآخر. وقد اقترب فى ذلك إلى أدنى مسافة بين فيلسوف وعالم فيزيقى فى تصور ديناميكية الاضطرابات. كانت عقيدته الفنية تفترض العمومية. فالدوامات لديه تعنى عدم الاتزان، وعدم الاتزان يعنى لديه أن تدفقا يصارع ضد عدم مساواة فى داخله، وعدم المساواة فكرة عامة، لا علاقة لها

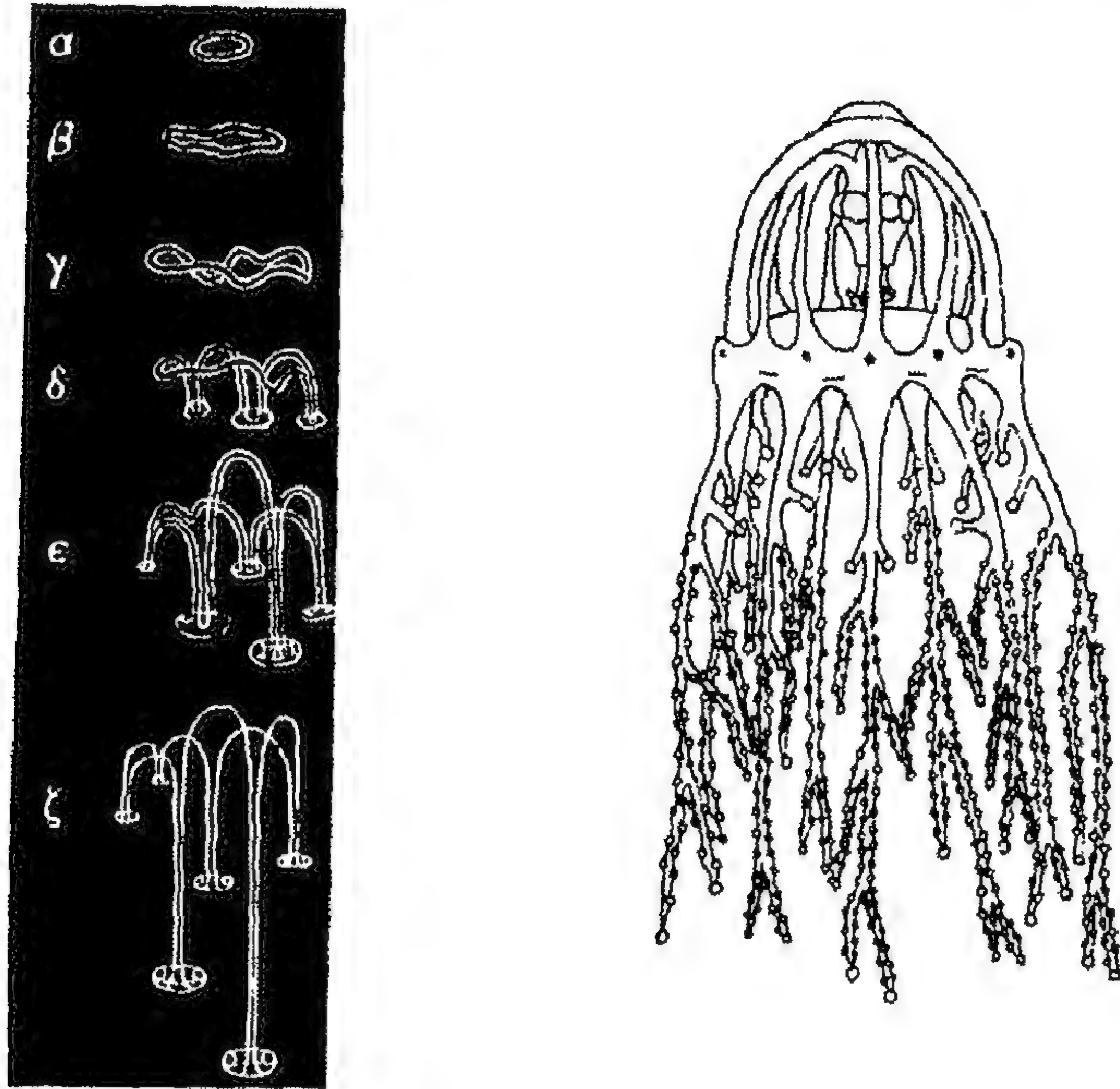
بطبيعة الوسط أو نوع الاختلاف؛ فكل من الدوامات المائية، والنباتات الملتفة، وسلاسل الجبال المتجعدة، جميعها تتبع خطا واحدا في نظره. فعدم المساواة قد يكون بين الحار والبارد، الملح والعذب، الحمضى والقلوي، البطيء والسريع، الكثيف واللطيف، اللزج والمائع. وعند الحدود، تزدهر الحياة.



شكل ٧-١ تموجات وتعرجات في مسارات الأنهار. رسم تيودور شفنك التيارات للتدفقات الطبيعية، والتي تسير كجداول من حركة ثانوية معقدة. يقول: "إنها ليست جداول حقيقية، بل أسطح بأكملها، تتداخل فراغيا"

على أن الحياة كانت هي مجال عالم البيولوجي دارسي تومسون D'Arcy Wentworth Thompson، والذي كتب عام ١٩١٧ يقول: "قد يقال إن كافة قوانين الطاقة، وخواص المادة، وتفاعلات الكيمياء، عاجزة عن شرح جسم الإنسان كعجزها عن فهم الروح، ولكن الأمر بالنسبة لي ليس كذلك". وقد أدخل دارسي تومسون في

البيولوجيا ما أهمله شيفنك، الرياضيات، فالأخير قد جادل عن طريق المقابلة، وكانت قضيته روحية، مزدهرة، موسوعية، انتهت بإظهار التماثل. وقد تشابه عمل دارسى الرائع "حول النمو والأشكال *On Growth and Forms*" مع شيفنك فى بعض من مزاجه وبعض من أسلوبه. ويعجب القارئ لصور دقيقة للغاية لنقاط من الماء المتساقط، بينما هى معلقة تتأرجح، متجاورة مع قناديل البحر، تماثلها فى الحياة بطريقة مذهشة. أهذه مجرد صدفة عارضة؟ أليس لنا حين نرى شكلين متماثلين، أن نتساءل حول أسباب مشتركة؟



شكل ٧-٢ قطرات متساقطة: صور دارسى القطرات المعلقة لنقاط الحبر وهى تتساقط خلال الماء (يسار) ولقناديل البحر (يمين). "نتيجة مثيرة أن نرى كيف تعتمد هذه القطرات بدرجة حساسة للظروف الابتدائية، كتغيير طفيف للغاية فى كثافة السائل.

يعتبر دارسى تومسون بلا جدال أقوى بيولوجي وقف على حدود العلم تأثيرا. فالثورة التى عاصرها فى علم البيولوجيا قد مرت دون التفات له بالمرّة، فهو قد أنكر الكيمياء، ولم يفهم الخلية تماما، وعجز عن توقع ثورة الجينات.

وكانت مقالاته، حتى في وقته، من الجمال بحيث لا تحسب كمقالات علمية. فلا يتخيل من دارس للبيولوجيا الحديثة أن يقرأ شيئاً من كتبه، ولكن أعظم البيولوجيين كانوا يجدون أنفسهم بصورة أو بأخرى مشدودين لها. لقد وصفها سير بيتر ميداوار Sir Peter Medawar بأنها. "بلا نقاش أجمل ما كتب من أدبيات العلوم في اللسان الإنجليزي على مدى تاريخ الكتابة العلمية". أما ستيفان جاي جولد Stephan Jay Gould فلم يجد أفضل منها ينسب إليه إحساسه الكامن بوحدة الطبيعة في تكوين الأشكال. فليس ثمة غيره من العلماء المحدثين قد تابع البحث في موضوع الوحدة التي لا تنكرها العين للخلائق، وقد عبر عن ذلك بقوله: "قليل هم من تساءلوا عما إذا كان بالإمكان اختصار الأنماط إلى نظام واحد للقوى المولدة. وقليل هم من وهبوا الإحساس بأهمية إثبات هذه الوحدة لعلم الأشكال العضوية."

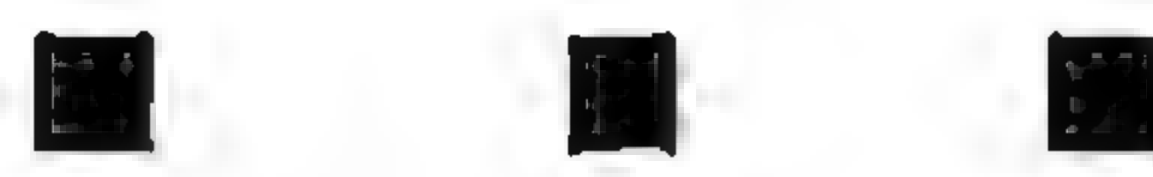
كان هذا الكلاسيكي، متعدد اللغات، الرياضي، عالم الحيوان، يحاول رؤية الحياة في كليتها، بينما العلم الحديث يسير في طريق تجزئتها إلى عناصرها الأولية. وانتصر تيار التجزئة، فكيف لك أن تفهم الخلية إلا بفهم الغشاء الخلوي والنواة، ومنها تتدرج إلى البروتينات والإنزيمات والكروموزومات ثم القواعد المزدوجة؟ إن البيولوجيا حينما خاضت في المخ والجهاز العصبي، فقدت الاهتمام بشكل الجمجمة. آخر إنسان يفكر في ذلك، لم يكن سوى دارسي تومسون. كما كان آخر بيولوجي عظيم على مدى سنوات يستجمع طاقة بلاغية لمناقشة قضية الأسباب مناقشة مستفيضة، خاصة في التمييز بين السبب الوظيفيⁱⁱⁱ final cause والسبب الفيزيقي physical cause. فالعجلة مستديرة لأن هذا هو أنسب الأشكال لأدائها لوظيفتها، أما الأرض فمستديرة لأنها خضعت لقوانين الفيزياء حين تكوينها. الأول سبب وظيفي، فهو مرتبط بالغرض من الشيء، والثاني سبب فيزيائي، مرتبط بالقوى المشكلة. وقد يجتمع السببان في شيء واحد، فالكأس مستديرة لأن هذا الشكل هو أنسب الأشكال لحفظ الماء حين الشرب، وهي كذلك لأنها تعرضت لأسلوب تشكيل معين.

وفي نطاق العلم ككل، تكون الغلبة للأسباب الفيزيكية. فالغائية لم تكن إلا في فترة تدثر العلم بعبادة الدين. على أنه في مجال البيولوجيا، فحين وضع داروين نظريته عن التطور، وضعها على أسباب غائية صرفة، وأصبح التركيز منصّباً على الأسباب الوظيفية، كما تملّوها نظرية الانتخاب الطبيعي، فشكل ورقة الشجر على هذه الصورة لأنه الشكل الأنسب لتجميع ضوء الشمس. وكم توسل "دارسي" للبيولوجيين ألا يهملوا

الأسباب الفيزيائية عند الأخذ بالأسباب الوظيفية. على أن دعوته لم تجد أذنا مصغية، تخيل الثراء عند التحدث في مدى ملائمة شكل ورقة الشجرة لوظائفها، ودور الانتخاب الطبيعي في الوفاء بهذه المطالب. فقط بعد حين من الزمن بدأ بعض العلماء يفكرون في الجانب غير المطروق من الطبيعة، إن أشكال ورق الشجر محدودة للغاية، بينما الأشكال المتصورة لا حصر لها، وعلى ذلك فشكل ورقة الشجر ليس محددًا بوظيفتها تحديدًا قاطعًا.

لم تسعف الرياضيات المتاحة لدارسي أن يبرهن على ما يريد إثباته، وأفضل شيء كان بإمكانه هو أن يرسم مثلاً الجمجمة لمجموعة من الأنواع، مظللاً أجزائها، ومبيناً أن تحول شكل للآخر يخضع لقواعد هندسية بسيطة للتحويل. وللكائنات البسيطة، حيث تحمل أشكالها تشابهاً يلفت النظر مع قطرات الماء وظواهر أخرى للتدفقات، فقد حاول إيجاد سبب فيزيقي، كالجاذبية والتوتر السطحي، وهي أسباب لم تسعفه فيما كان يصبو إليه. لماذا إذن كان ألبرت لبشابر يفكر في "عن النمو والأشكال" حين بدأ تجاربه عن السوائل؟

إن حدس دارسي عن القوى التي تشكل الحياة هي أقرب شيء في مجال البيولوجيا إلى منظور النظم الديناميكية. لقد نظر للحياة كحياة، دائبة الحركة، تستجيب دائماً إلى الإيقاع؛ "الإيقاعات الكامنة في عمق عملية النمو" التي كان يعتقد أنها خلقت الهيئات عامة الوجود. فهو لم يعتبر أن دراسته الحققة تقتصر على الشكل المادي للأشياء، بل على ديناميكيته، "التفسير، بمفهوم القوة لعمليات الطاقة". لقد كان رياضياً بالقدر الكافي لأن يفهم به أن تجميع الأشكال لا يعني شيئاً، ولكنه كان شاعرياً بالقدر الكافي بأن يحس بأنه لا الصدفة ولا الغرض يمكن أن يفسرا الوحدة المبهرة للأشكال التي جمعها على مر سنوات من التحديق في الطبيعة. إن القوانين الفيزيائية يجب أن تفسر كيفية تحكم القوى في عملية النمو، الأمر الذي كان خارج نطاق الفهم لأمد طويل. أفلاطونية مرة أخرى. وراء كل شكل منظور، لا بد وأنه تقبع أشكال غامضة غير منظورة تقوم بعمل الأنماط القياسية، إنها الأشكال حية متحركة.



اختار لبشابر الهليوم السائل لتجربته، والهليوم السائل ذو لزوجته متناهية في الصغر، ومن ثم فيدفع للتحرك بأقل دفعة. ولو اختار شيئاً آخر كالماء أو الهواء لاحتاج

صندوقاً أكبر. وبواسطة اللزوجة المنخفضة، جعل لبشابر تجربته في غاية الحساسية للتسخين. ولبدء تيارات الحمل في خليته الدقيقة، كان محتاجاً لفرق بين القاع والسطح يعادل جزءاً من ألف جزء من درجة الحرارة. ولو كان الصندوق أكبر حجماً، حيث يكون السائل حر الحركة بصورة أكبر، فإن فرق درجتى الحرارة يكون أصغر. فلصندوق أكبر بنسبة عشرة أضعاف يكون الفرق في حدود جزء من مليون جزء، وهو فرق يستحيل التحكم فيه.

وكرّس لبشابر ومهندسه في بناء التجربة جهداً بالغاً لجعل الحركة التي هم بصدد دراستها في أدنى صورة لها. فحركة الموائع وهي تتحول من السلسلة إلى الاضطراب يزداد التعقد فيها بسرعة خرافية، حيث تنتج الدوامات والتموجات بصورة يصعب ملاحظتها. ولذا فهو قد جعل الفراغ في التجربة أقرب ما يكون لنقطة بلا أبعاد. وإنتاج حركة في حيز محدود أفضل بمراحل من التدفق في حيز مفتوح كتيارات المحيطات مثلاً، حيث يزداد التعقد بدرجة تستعصى على الدراسة التي هو بصدها.

وحيث إن الحمل في صندوق مغلق ينتج موجات دورانية في السائل أشبه بأصابع السجق، أو لنقل في هذه التجربة أشبه ببذور السمسم، فقد اختار لبشابر أبعاد جهازه بعناية بحيث تتولد دورتان من تيار الحمل بالضبط، يتصاعد السائل في المنتصف، ثم ينقسم عند السطح إلى دورة لليمين ودورة لليساار. دورتان غاية في الدقة الهندسية، خطوط مساريهما في غاية الإتقان.

وخلال التجربة، يأخذ الهليوم في الدوران داخل الخلية التي هي بداخل الوعاء المفرغ بداخل حمام النيتروجين، ولقياس الحرارة غرس في سفير السطح العلوى مجسّين غاية في الدقة، تسجل قراءتهما عن طريق راسم، فيتاح له مراقبة الحرارة عند نقطتين على السطح. لقد كانت تجربة غاية في الدقة والحساسية، كما وصفها أحد الفيزيائيين، لقد تمكن لبشابر من خداع الطبيعة.

استغرقت التجربة بهذا الإبداع الأسطوري من الدقة عامين كاملين لتؤتي نتائجها، ولكنها، كما قال لبشابر، كانت الأداة المطلوبة لعمله بالضبط. وأخيراً رأى كل شيء؛ فبإجراء التجربة متواصلة ليل نهار على مدى العامين، أتيح له رؤية نمط ثرى لبدء الاضطراب يفوق خياله. لقد ظهر تتابع تضاعف الفترات. لقد جعل لبشابر حركة سائل يرتفع مع تسخينه محدودة نقية إلى أقصى حد، فوجد العملية تبدأ بأول حالة استقرار يتوازن فيها السائل عند درجة حرارة مناسبة لا تزيد عن جزء من ألف من درجة الحرارة.

إلى الآن كانت التجربة كلاسيكية غير مثيرة، وكانت بالضبط معبرة عن النموذج الذى وضعه لورنز بمعادلاته الثلاث. ولكن تجربة حية، بسائل حقيقي، وصندوق صنع على يد صانع، ومعمل معرض للاهتزازات من وسائل المرور الباريسية، كل ذلك جعل مهمة تجميع البيانات أكثر صعوبة من مجرد تجميع أرقام من حاسوب.

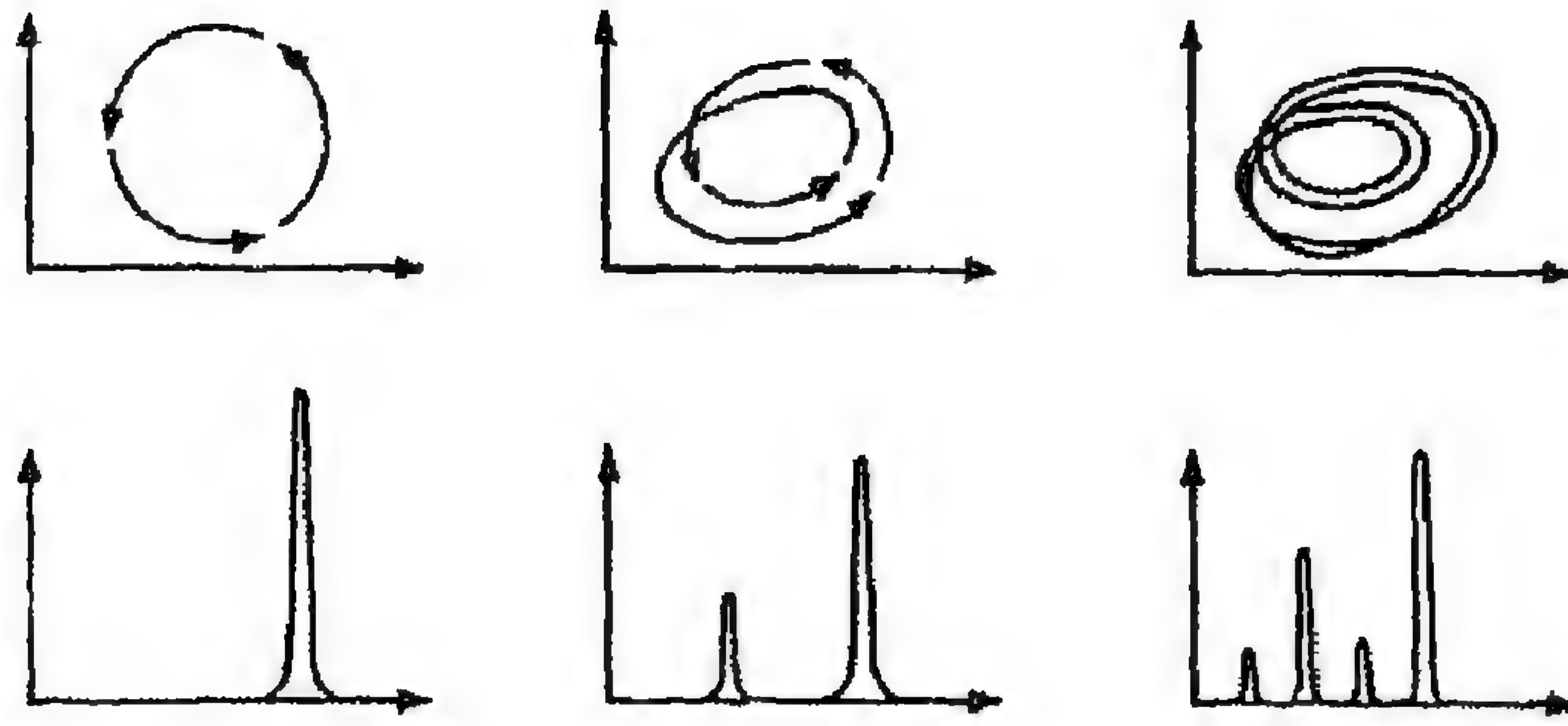
عند اتزان الحركة بعد الاستقرار الأول، تكون درجة الحرارة عند أية نقطة على السطح ثابتة إلى حد ما، ويقوم الراسم برسم خط مستقيم. وعند رفع درجة الحرارة، يبدأ عدم التوازن، ويرسم الراسم خطاً متموجاً.

من خط بسيط يمثل الحرارة، تشوبه الذبذبات بسبب الشوشرة، يصعب تحليل تردد التغير فى درجة الحرارة لعزل الصورة الحقيقية لتصرف السائل عن الشوشرة المحيطة بالتجربة. ولهذا الغرض استخدم لبشابر جهازاً خاصاً يسمى محلل الموجات، كالذى يحلل النغمات الصوتية إلى تردداتها. يخرج هذا الجهاز خطاً مشوشاً يمثل الشوشرة، ثم يسجل كل تردد حقيقى كقفزة فجائية على الشكل الناتج.

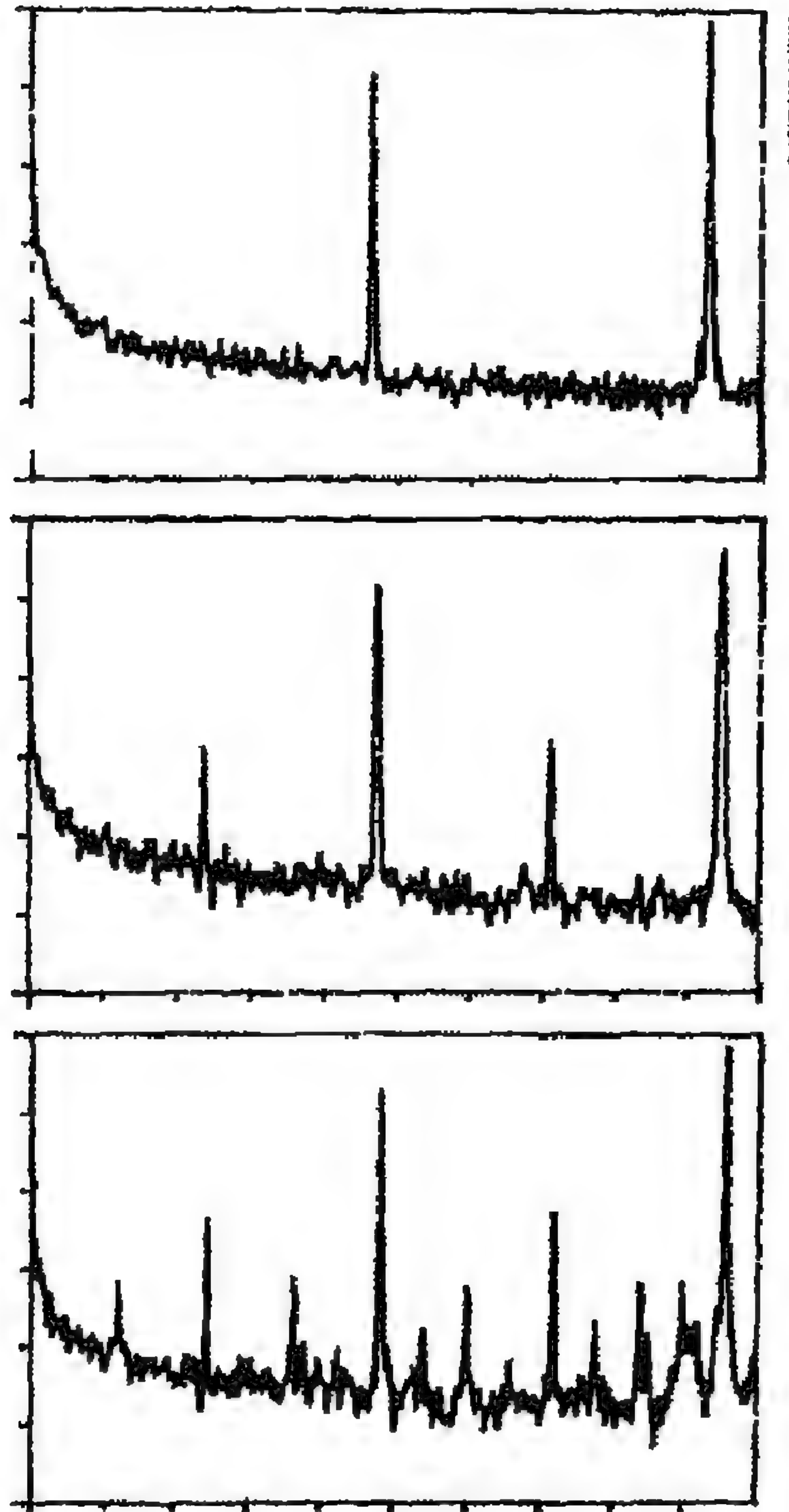
فى تجربة لبشابر كان الطول الموجى للتردد عند التوازن الأول ثانيتين.

ومع الاستمرار فى رفع درجة الحرارة وازدياد التعقيد فى شكل الخط المرسوم، ظهر تردد جديد مع التردد الأول، بطول موجى يساوى ضعفه بالضبط، إذ يتكرر كل أربع ثوان. إنها حالة التوازن الثانية. وعند كل حالة استقرار جديدة تنشأ مع الاستمرار فى رفع درجة الحرارة، تتوالى حالات التفرع الثنائى، أربع دورات، فثمانية، وهكذا.

لو أن لبشابر كان قد سمع وقتها عن اكتشاف فاجنباوم لظاهرة العمومية، لعرف بالضبط أين يتوقع التفرعات الثنائية، وكيف يقدر قيمها. فى ١٩٧٩ كان العدد من بين الرياضيين والفيزيائيين من ذوى النزعة الرياضية المهتمين باكتشاف فاجنباوم يتنامى، ولكن الكثرة الغالبة رأَت الحكمة فى التحفظ عن إبداء الرأي. فتمثيل التعقد على خرائط ماى أو فاجنباوم لنظم وحيدة البعد شيء، والقيام بذلك لنظم ثنائية أو ثلاثية أو رباعية الأبعاد، كالأنظمة الميكانيكية التى يصممها المهندسون شيء آخر. فهذه النظم محتاجة لمعادلات تفاضلية قوية، وليس مجرد معادلة للفروق. ثم إن هناك فجوة أخرى بين النظم قليلة الأبعاد ونظم تدفق الموائع، والتى ظنَّها العلماء لانهائية الأبعاد. فحتى خلية لبشابر متقنة الصنع تحتوى على عدد لانهائى من الجزيئات، يبدى كل جزيء منها مقدرة على الحركة على استقلال، حين يدخل فى دوامة أو اضطراب.



شكل ٣-٧ نظرتان للتفرع الثنائي: حين تنتج تجربة كتجربة لبشابر للحمل حركة دورية مستقرة بتردد ثابت، فإن قضاء الطور يكوّن منحنى مغلقاً يكرر نفسه على الدوام (أعلى يسار)، يمثل نبضة واحدة في التحليل الطيفي (أسفل يسار). ومع تطور التجربة يكون التوازن مستقراً على دوريتين، (الشكلين الأوسطين) ثم أربعة ترددات (يمين أعلى وأسفل).



شكل ٤-٧ بيانات من العالم الواقعي تؤيد النظرية. منحنى توزيع الترددات كما

استنبطه لبشابر من التجربة تبين ارتفاعات المقابلة للترددات، أما الاهتزازات الطفيفة فهي الشوشرة. يبين الشكل مع قيمة الترددات مقدار قوتها.

وكان بيير هوهنبرج Pierre Hohenberg من معامل AT& T Bell هو من جمع شمل المنظرين والتجريبيين. كان قد أنشأ ورشة عمل في أسبن Aspen، حضرها لبشابر في عام ١٩٧٩ (قبل ذلك بأربع سنوات استمع فيها فايجنباوم لسمول وهو يتحدث عن رقم، مجرد رقم، يلاحظه الرياضيون عند التحول إلى الهيلولية في معادلة ما). وحين تحدث لبشابر عن تجربته، أخذ هوهنبرج ملاحظات، قدمها فيما بعد إلى فايجنباوم، الذي قرر السفر إلى باريس للقاء لبشابر، حيث استمع منه عن تجربته، واستمع لبشابر منه عن نظريته. يتذكر لبشابر هذه الزيارة وكيف أنه اندهش لرؤية عالم تنظري بهذا الشباب وأيضا، بهذه الحيوية.



كانت القفزة من النظرية إلى الواقع العملي كبيرة، لدرجة أن الكثيرين من المشتغلين بالموضوع كانوا ينظرون إليها كحلم. لم يكن واضحا بالمرّة كيف يمكن للطبيعة أن تربط بين هذه الدرجة من التعقيد، وهذه الدرجة من البساطة. يقول جلوب: "إنها أشبه بالمعجزة، ليست مجرد حادثة من حوادث توافق النظرية مع التجربة." وخلال عدة سنوات، تكررت المعجزة في معامل لا حصر لها، في أوعية أوسع من الماء والزئبق، وفي مذبذبات إلكترونية، وأجهزة ليزر، وحتى في تفاعلات كيميائية. كانت النظريات تتبع تكنيك فايجنباوم، كما وجدت طرق أخرى للوصول للهيلولية، كالتقطع intermittency وشبه الدورية quasiperiodicity، وكلها ثبتت عموميتها نظرياً وتجريبياً.

واكتشف التجريبيون قيمة الحاسوب في إجراء التجارب، فهو ينتج نفس النتائج ولكن بسرعة فائقة وكفاءة عالية. كما أخرج في نظم معقدة نفس الرقم الذي استنبطه فايجنباوم في نظامه البسيط. في عام ١٩٨٠ أثبت فريق أوربي كيف يحدث ذلك رياضياً، فالتشتت الذي يستنفذ النظم المعقدة للحركات المتضاربة يجعل تصرفها يهبط بالتدريج إلى مستوى النظم وحيدة البعد.

وخارج الحاسوب، كان الحصول على الجاذبات الغريبة تحدياً صعباً، شغل عالماً مثل هاري سويني إلى منتصف الثمانينات. ففي الحاسوب تجرى التجارب بمنأى عن

التشويش والضوضاء، بينما في المعامل، وكذا في الطبيعة، يلزم فصل المعلومات عن هذه الصور من التداخل.

على أن استخدام الحاسوب لا يخلو أيضا من نقاط ضعف في مواجهة التجارب العملية. فتمذجة الموضوع حاسوبيا عمل يقوم به المبرمجون، ويلجئون في ذلك إلى تقطعة أوصال الحالة إلى أجزاء لإمكان تمثيلها حاسوبيا، وهنا تثار مسألة مدى تطابق النمذجة الحاسوبية مع الواقع. ويقول المنحازون للتجارب العملية إن النمذجة الحاسوبية نوع من التنقيح المغالي فيه للحسابات، ولكنها لا تؤدي إلى اكتشافات حقيقية، فهذا سيظل على الدوام شرفا مقصوراً على المعلمين.

وقد ظل الكثيرون من الفيزيائيين يعتبرون أن تجربة لبشابر تنتمي للرياضيات أكثر من انتمائها للفيزياء، فالأنماط التي استنبطها كانت تجريدية، لا تقول شيئا عن خواص الهيليوم أو النحاس أو تصرف الذرات بالقرب من الصفر المئوي. لقد مهد لعالم ما لبث غيره من المهندسين والكيميائيين أن ارتادوه. كانت أنماطه دائما هناك، تلك التي استنبطها عندما عزل التفرع الثنائي الأول، ثم الذي يليه والذي يليه، وهكذا. وطبقا للنظرية الجديدة فإن التفرع الثنائي من المفروض أن ينتج هندسة دقيقة للمقياسية، وهذا بالضبط ما رآه لبشابر، حيث تحول رقم فايجنباوم من رقم نظري رياضي إلى حقيقة واقعة وملموسة. لم ينس أبدا الإثارة التي عايشها وهو يرى التفرع يتوالى أمام عينيه، ثم إدراك أنه يرى تتابعا لانهائيا، غاية في الثراء. كانت، على حد قوله، لحظات غاية في الإثارة.

أ يمكن للتغذية الخلفية أن تكون إيجابية، حيث يعزز تأثير المخرجات من قيمة المدخلات، وهو ما يسبب الاهتزاز أو الاضطراب، كما يمكن أن تكون سلبية، فيكون تأثير المخرجات على المدخلات مضادا، وهذا النوع له أثر حميد في استقرار النظم الديناميكية-المترجم

أأ يلاحظ القارئ أننا ترجمنا Chaos هنا بالذات بفوضوية وليس بهيولية، ذلك لأن فكرة الهيولية لم تكن قد ظهرت علميا بعد، فاللفظ هنا يقصد به بالفعل في هذا العنوان الفوضى التي كان الجميع لا يزالون إلى ذلك الحين يعتقدونها في الظواهر الطبيعية - المترجم، وننوه هنا بما سيرد في فصل لاحق عن عدم رضا الكثيرين عن إطلاق اسم chaos على هذا العلم، لما يثيره من مثل هذا اللبس، وهو نفس ما أخذناه على من أسماه بعلم الفوضى.

أأ الترجمة الحرفية "السبب الفيزيائي" ولكننا نفضل الترجمة المبينة لسهولة التبع. المترجم

صور الهولوية

قابل ميشيل برانسلي Michael Barnsley، رياضي واسع الثقافة من أوكسفورد، فايجنباوم في مؤتمر بكوروسيكام عام ١٩٧٩، وهناك علم بنظرية العمومية وتضاعف الفترات والتسلسل اللانهائي للتفرع. فكرة رائعة، كفيلة بأن تجعل العلماء يهرعون إليها، أما عن نفسه، فكان يعتقد أنه قد رأى شيئاً لم يلحظه أحد من قبل.

هذه المتتابعات لفايجنباوم، هذه الدورات: ٢، ٤، ٨، ١٦، من أين تأتي؟ هل تأتي كسحر من فراغ رياضي، أم تراها تشير إلى ظل لشيء أكثر عمقا؟ إن بديهته تتجه إلى أن هذا يجب أن يكون جزءاً من كائن فراكتلي مذهل، مختبئ عن الأنظار إلى درجة كبيرة.

كان لديه سياق معين لهذه الفكرة، مؤسسة على الفئة من الأعداد المسماة "الأعداد المركبة" *complex numbers*. وتختلف هذه الأعداد عن الأعداد العادية المألوفة لنا في أن كل عدد منها مُركَّب من عددين، الأول يُسمى الجزء الحقيقي *real*، والثاني يسمى الجزء التخيلي *imaginary*. وبينما يمكن تمثيل الأرقام العادية كنقطة على خط، كالمحور الأفقي أو المحور الرأسي، فإن الأرقام المركبة يجب أن تمثل كنقطة في مستوى، ذات إحداثيين. وقد اصطلح على أن يكون المحور الأفقي هو الذي يمثل الجزء الحقيقي، والمحور الرأسي هو الذي يمثل الجزء التخيلي، كما اصطلح على أن يكون الجزء التخيلي عند كتابته مسبقاً بحرف *t* (اختصار "تخيلي")، بينما يُميّز في اللغات اللاتينية بالحرف *i* (اختصار لكلمة "imaginary") للتمييز بينه وبين الجزء الحقيقي، مثلاً: $2+3i$. وفي هذا النظام تكون الأعداد الحقيقية هي حالة خاصة، أرقام مركبة جزؤها التخيلي يساوي الصفر، وتمثل بنقطة على محور السينات. وقد تصور برانسلي أن النظر إلى الأرقام العادية ذات البعد الواحد فقط من شأنه أن يخفي أسراراً للأشكال من شأنها أن تظهر لو نظر للأرقام نظرة تشمل البعدين معاً.

وقد كانت نشأة الأرقام التخيلية أساساً لحل المسألة: ما هو جذر مقدار سالب؟ نعلم أنه لا يوجد في الطبيعة جذر لمقدار سالب، ببساطة لأن أي مقدار يضرب في

نفسه، سواء أكان موجبا أو سالبا، فإن حاصل الضرب مقدار موجب. ولعل هذه الفجوة من وجهة نظر الرياضيات البحتة، اصطُح على أن جذر المقدار السالب هو كمية تخيلية (غير موجودة في الطبيعة)، وبالتالي فإنه بينما نقول إن جذر ٤ هو ٢، فإن جذر -٤ هو ٢ت. وبالمثل، فحين أن مربع الرقم الحقيقي الموجب $(٢)^٢$ أو السالب $(٢-)^٢$ ، فإن مربع الرقم التخيلي الموجب $(٢ت)^٢$ أو السالب $(٢ت-)^٢$ ، فهي إذن وسيلة لحل المعادلات الرياضية البحتة. والأرقام المركبة يمكن أن تجرى عليها كل العمليات الحسابية والرياضية المعتادة، شأنها في ذلك شأن الأرقام الطبيعية.

وحين بدأ برانسلي في ترجمة معادلات فاينجناوم إلى سياق الأرقام المركبة، بزغت له خطوط عامة لمجموع من أشكال فائقة، تبدو مرتبطة بأفكار علماء فيزياء النظم الديناميكية، ولكنها أيضا تذبذب اللب كتركيبة رياضية.

لقد اتضح له أن هذه الدورات ليست ناشئة من فراغ بالمرة. فهي تنتمي للفئة الحقيقية من مستوى أرقام مركبة. فلو أنك نظرت ملياً، لوجدت تجمعات من الدورات، ثنائية، ثلاثية، رباعية، ... الخ. وهرع برانسلي إلى مكتبه في معهد جورجيا للتكنولوجيا Georgia Institute of Technology، وكتب بحثاً أرسله على جناح السرعة إلى مجلة الفيزياء الرياضية Mathematical Physics التي كان رئيس تحريرها في هذا الوقت، وبمحض الصدفة، دافيد رول، ولم تكن استجابة رول مشجعة بالمرة. لقد أعاد برانسلي في الواقع، ودون أن يدري، الكشف عن بحث قديم، يعود إلى ربع قرن مضى، لرياضي فرنسي. ويقول برانسلي متذكراً: "أعاد لي رول البحث كبطاطة ملتهبة، قائلاً: "ميشيل، إنك تتحدث عن فئات جوليا."

كما أضاف رول نصيحة لبرانسللي: "اتصل بماندلبروت".



قبل ذلك بثلاثة أعوام، كان جون هبارد John Hubbard يُدرّس الرياضيات لطلاب السنة الأولى في أورساي Orsay بفرنسا. وكان ضمن منهجه الدراسي طريقة نيوتن الكلاسيكية في حل المعادلات، عن طريق التجربة القائمة على التقريب المتتالي. وشعورا منه بالضجر، قرر أن يدرس هذه الطريقة بأسلوب جديد، يدفع طلابه للتفكير.

وطريقة نيوتن قديمة، بل موهلة في القدم، فقد كانت معروفة من عهد الإغريق، إذ استخدموها لإيجاد جذور الأعداد. وتبدأ الطريقة بتخمين إجابة، وبحساب الخطأ

تجرى محاولة لتخمين أفضل، وهكذا يقترب الإنسان من الحل الصحيح عن طريق تكرار عملية التقريب. وهي عملية سريعة، حيث تتضاعف درجة التقريب في كل مرة.

والجذور في أيامنا هذه تستخرج بطريقة تحليلية بسيطة، ولهذا فحل المعادلات من الدرجة الثانية، وهي التي يكون فيها المجهول مرفوعاً إلى القوة ٢، أمر يسير. وعلى ذلك فإن طريقة نيوتن تستخدم للمعادلات من درجات أعلى، والتي لا تُحل بطرق مباشرة. كما أن هذه الطريقة محبذة كثيراً في وضع خوارزميات البرامج الحاسوبية، فعملية التكرار هي أولاً وأخيراً مكنى قوة الحاسوب.

والشيء المزعج في تطبيق طريقة نيوتن أن حل المعادلات الجبرية له أكثر من إجابة. والإجابة التي سوف يتجه إليها تطبيق طريقة نيوتن تعتمد على التخمين الأولي. وإذا ما وجدت أن تخمينك الأولي سوف يؤدي بك إلى غير إجابة، فعليك أن تبدأ من موضع آخر. ومن البديهي أن يزداد تطبيق الطريقة تعقيداً كلما ازدادت درجة المعادلة. وهذا ما وعد هبارد طلابه في التفكير فيه.

فبالنسبة للمعادلة من الدرجة الثالثة، والتي لها ثلاثة حلول، فإن التفكير في المسألة هندسياً يوحى بتقسيم مستوى الإحداثيات إلى ثلاثة قطع، كل قطعة تحتوى على أحد الحلول. ولكن هبارد اكتشف أن أشياء غريبة تحدث عند الحدود. كما اكتشف أيضاً أنه ليس أول من فكر في ذلك، فقد سبقه بعض علماء القرن التاسع عشر، ولكنه يتفوق عليهم بأن تحت يديه وسيلة لم تكن متاحة لهم، ألا وهي الحاسوب.

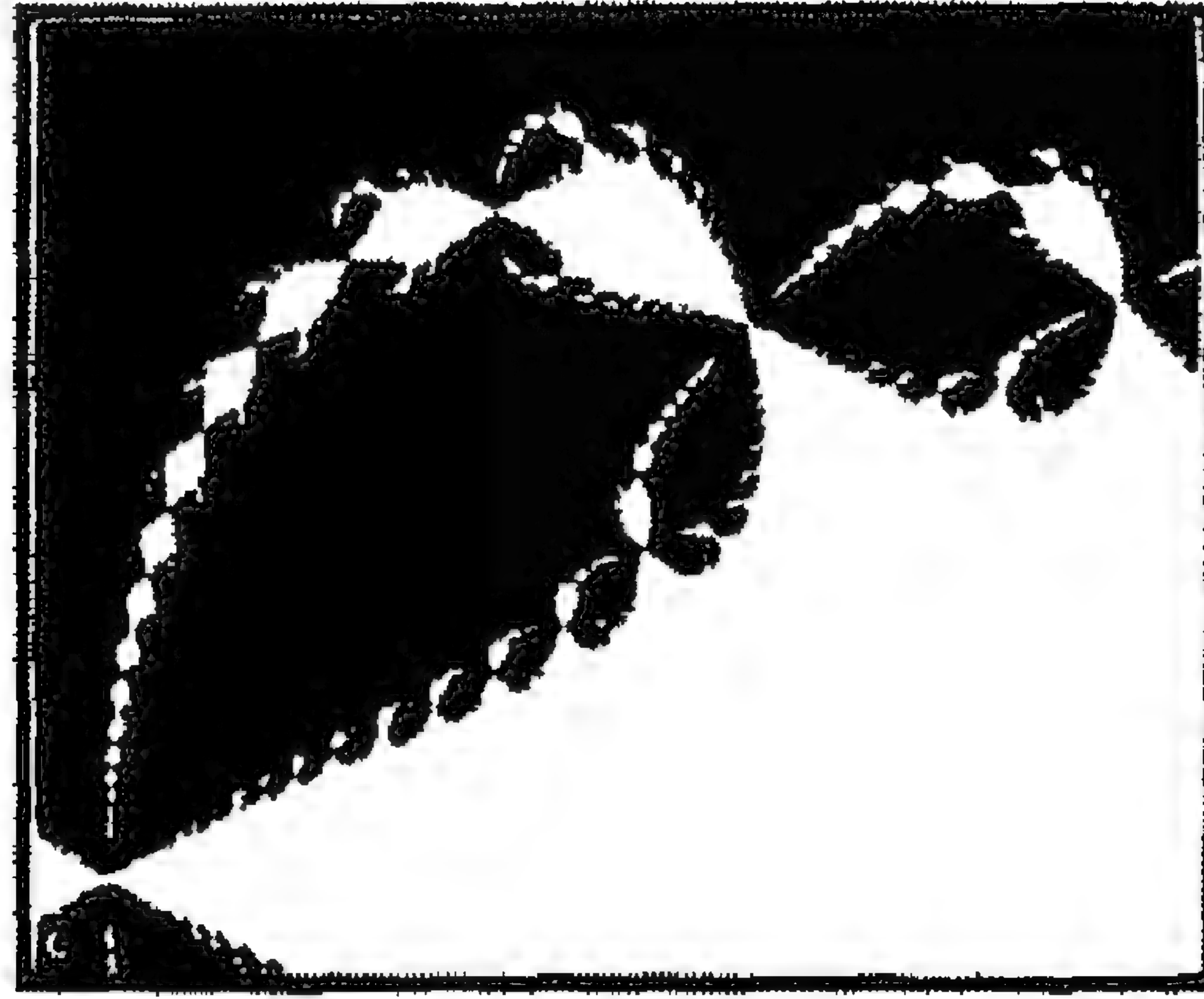
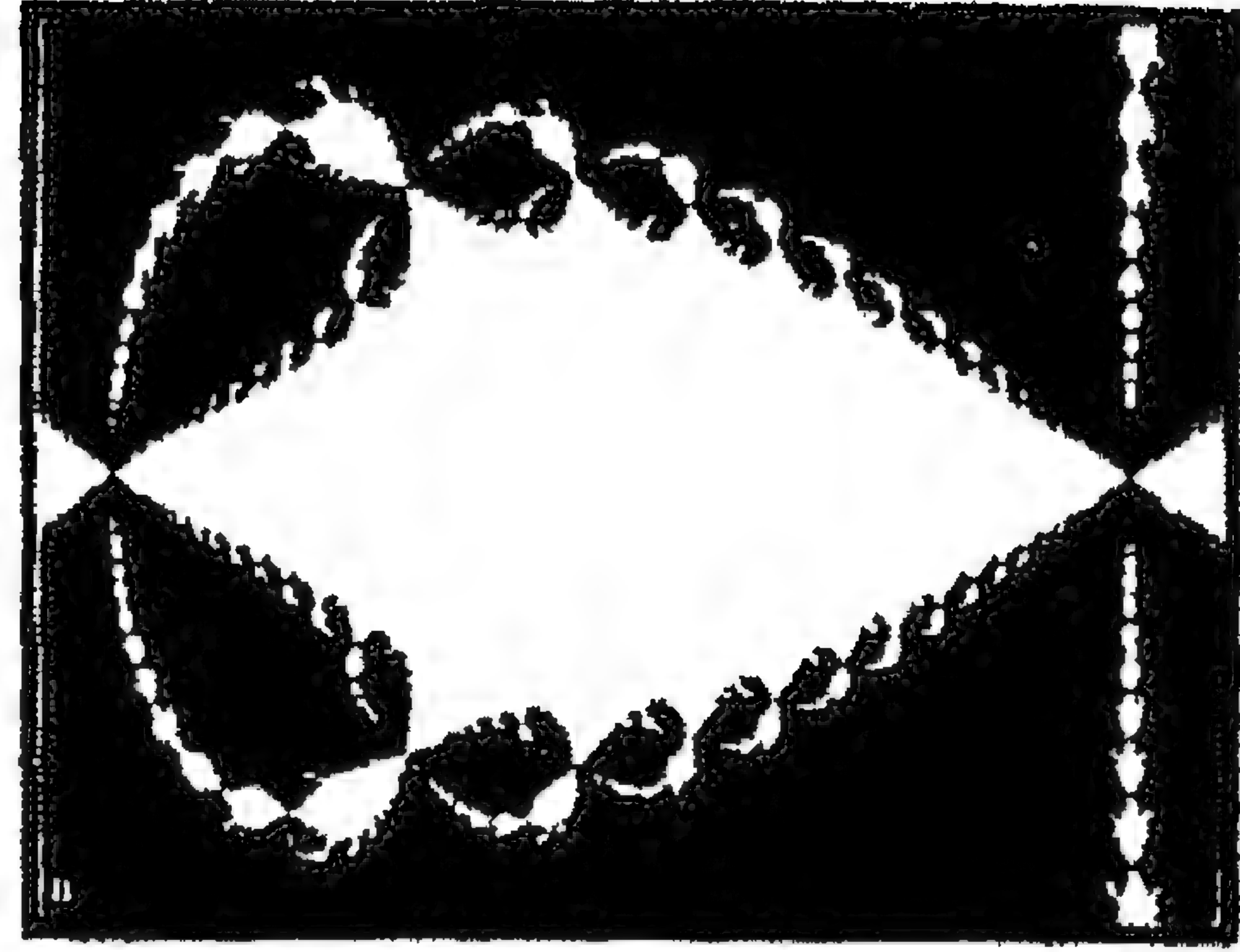
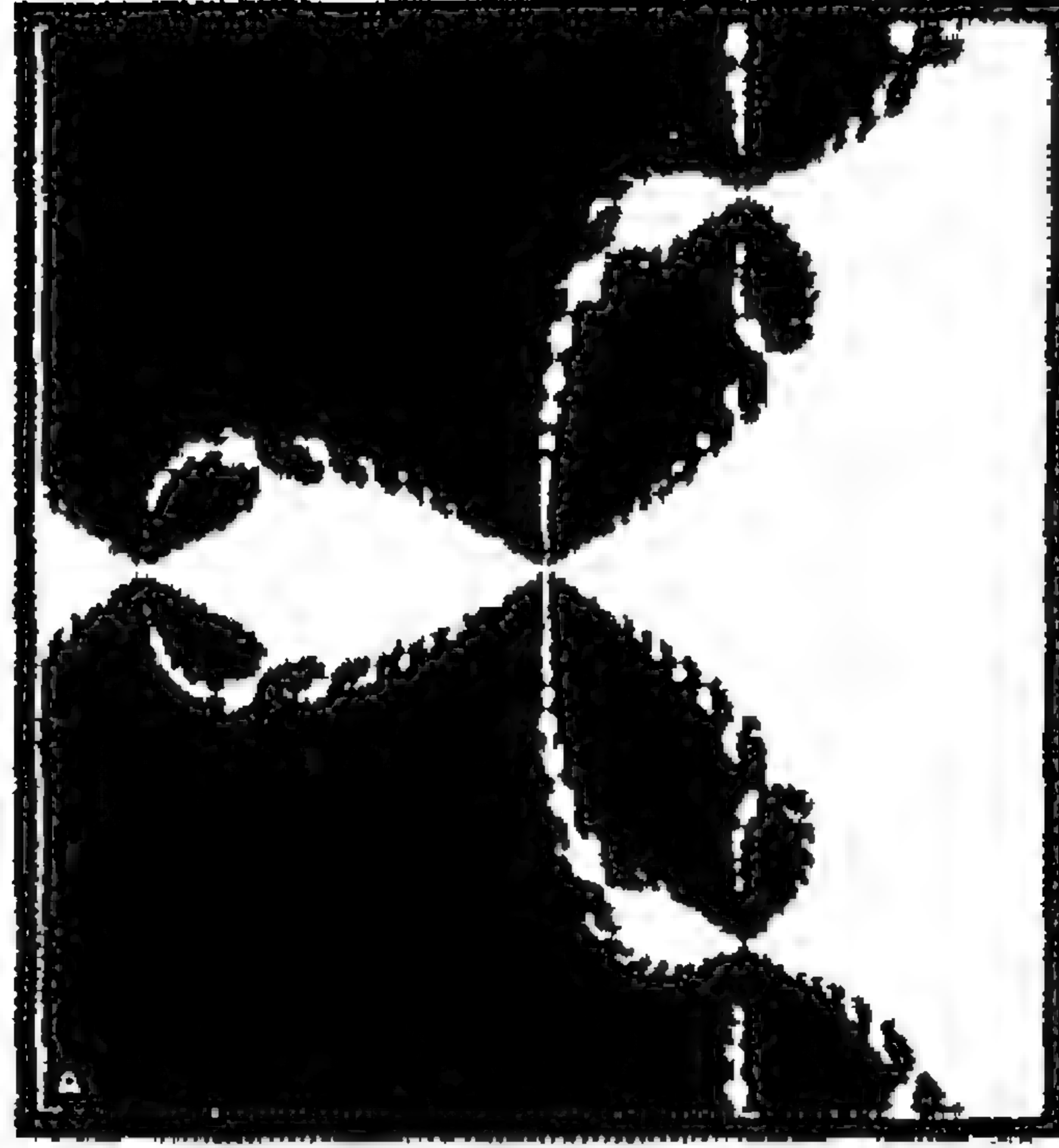
كان هبارد من الرياضيين الذين يكرهون التخمين، ويفضلون البرهان الحاسم. وقد كان مُصرّاً، بعد عشرين عاماً من دخول جاذب لورنز الكتابات العلمية، أنه ما من برهان حاسم على أن هذه المعادلات تؤدي بالفعل إلى جاذب عجيب، فالأمر ليس إلا تصوراً يعوزه البرهان. إن الحلزون المزدوج ليس برهاناً، بل مجرد شيء رسمه الحاسوب.

والآن، بدأ هبارد رغماً عن نفسه في عمل ما لم يعمله الرياضيون التقليديون. إن الحاسوب لن يبرهن شيئاً، ولكنه على الأقل قد يكشف القناع عن حقائق توضح للرياضي ما هو بصدد برهنته. وهكذا بدأ تجربته. وهو قد عالج طريقة نيوتن ليس كطريقة لحل المسائل، بل كمسألة قائمة بذاتها. ونظر في أبسط معادلة من الدرجة الثالثة، س^٢-١=صفر، وهي تعنى ببساطة إيجاد الجذر التربيعي للعدد ١، في فئة الأعداد الحقيقية، الحل هو ١، ولكن في فئة الأعداد المركبة، فإن للمسألة ثلاثة حلول،

إذا رسمت بيانياً، فإن الحل الأول يقع على الخط الأفقى (الحل الحقيقى) ثم يكون كل حل من الحلين الآخرين على زاوية ١٢٠ درجة مع المحور الأفقى، والحلول الثلاثة على محيط دائرة مركزها نقطة الأصل. والآن، فإذا بدأنا برقم مركب معين، فإلى أى حل سوف تقودنا طريقة نيوتن؟ تبدو المسألة كما لو كانت طريقة نيوتن نظاماً ديناميكياً، وكل حل من الحلول يمثل جاذباً. أو كما لو كان المستوى الإحداثى سطحاً به ميول تؤدي لثلاثة وديان، ولو وضعت كرة على موضع منه وتركت لتتدحرج، فسوف تنتهى إلى أحد تلك الأودية.

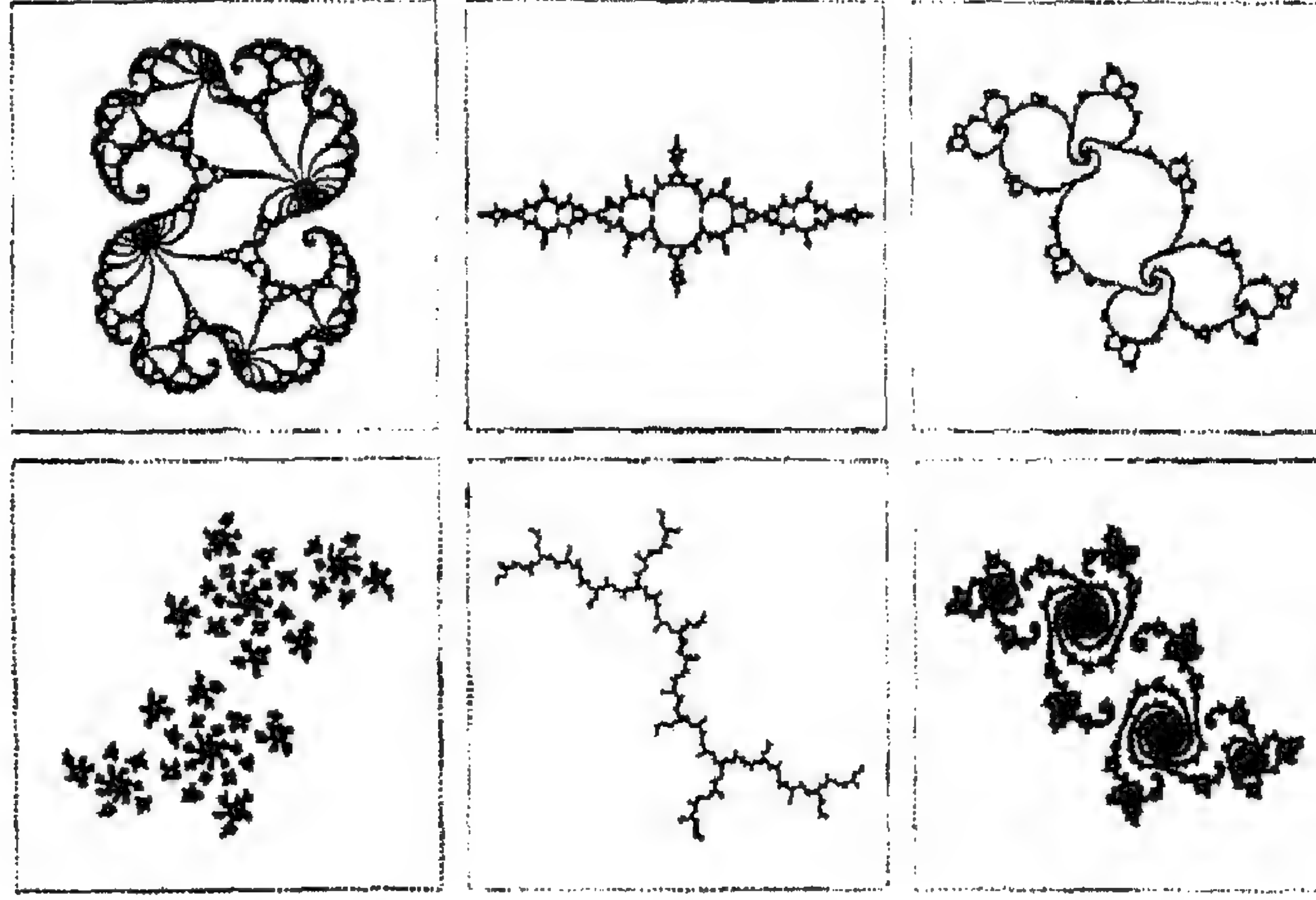
وجعل هبارد حاسوبه يمسح نقاط مستوى الإحداثيات، ليحسب تدفق طريقة نيوتن لكل نقطة، ثم أعطى للنتائج ألواناً؛ النقطة التى سوف تؤدي للحل الأول نقطة زرقاء، والتى تؤدي للثنائى حمراء، وللثالث خضراء. وعند أدنى درجة من التقريب، وجد هبارد أن ديناميكية طريقة نيوتن تقسم المستوى بالفعل ثلاثة قطع. فبصورة عامة، النقاط التى تجاور حلاً معيناً تؤدي إليه. ولكن نوعاً من التنظيم الداخلى المعقد قد كشف عنه الحاسوب، لم يكن ليخطر ببال رياضى من قبل. فبينما أدت بعض النقاط إلى الحل بسرعة وسلاسة، فإن البعض الآخر منها قد أخذ يتراقص عشوائياً قبل أن يتقارب إلى حل معين. أحياناً أخذت بعض النقاط تدور فى دورات منغلقة، بدلاً من التقارب لحل ما.

وحينما دفع هبارد بحاسوبه إلى دقة أكثر فأكثر فى إظهار التفاصيل، ذهل مع طلبته من الأشكال التى أخذت فى الظهور. فبدلاً من وجود حد واضح بين الأحمر والأزرق مثلاً، ظهرت بقع من اللون الأخضر عند خط الحدود بين اللونين، متصلة ببعضها البعض كعقد من اللؤلؤ. كان ذلك أشبه بوقوع الكرة فى تأرجح بين واديين، فإذا بها تنتهى ليس إلى واحد منهما، بل إلى الوادى الثالث. لم يتكون قط حد فاصل بين لونين. فعند قدر أكبر من التفصيل، اتضح أن منطقة تلاقى البقعة الخضراء الدخيلة مع الأزرق، تحتوى على بقع حمراء، ومع الأحمر تحتوى على بقع زرقاء وهكذا؛ لقد أظهرت الحدود أخيراً لهبارد خاصية مميزة، محيرة حتى لشخص على دراية بأشكال مندلبروت الفظيعة؛ لا توجد نقطة قط تعمل كفاصل بين منطقتين لونيتين. فى أية نقطة يود لوانان التقارب عندها، يقحم اللون الثالث نفسه، بنمط يكرر نفسه فى تماثل ذاتى على الدوام. إن أية نقطة تلاقى تتحول، وبصورة تبدو مستحيلة، إلى منطقة تحتوى على الألوان الثلاثة.



شكل ٨-١ حدود بتعقيد لانهاى. حين تقطع فطيرة ثلاث قطع، فإنها تتلاقى فى نقطة واحدة، وتكون الحدود بين أية قطعتين بسيطة. ولكن عمليات كثيرة للرياضيات البحتة وكذا فى العالم الواقعى تنتج حدودا بدرجات من التعقيد لا يتصورها عقل.

فى أعلى الصورة، طريقة نيوتن مطبقة لإيجاد الجذر التكعيبي للعدد ٨، وهو يقسم المستوى إلى ثلاثة مناطق متطابقة، أحدها مصورة باللون الأبيض، ٢ كافة النقاط البيضاء "تنجذب" إلى الجذر الذى يقع فى أقصى منطقة بيضاء، بينما تنجذب النقاط السوداء إلى أحد الجذرين الآخرين. الحدود لها تلك الخصيصة المتميزة، وهى أن كل نقطة عليها تقع بين المناطق الثلاثة. وتبين الصور الثلاث، والمتدرجة فى التكبير، أن تكبير أية منطقة يكشف عن هيكل فراكتلى، يكرر النمط الأصيل على مقياس أصغر فأصغر.



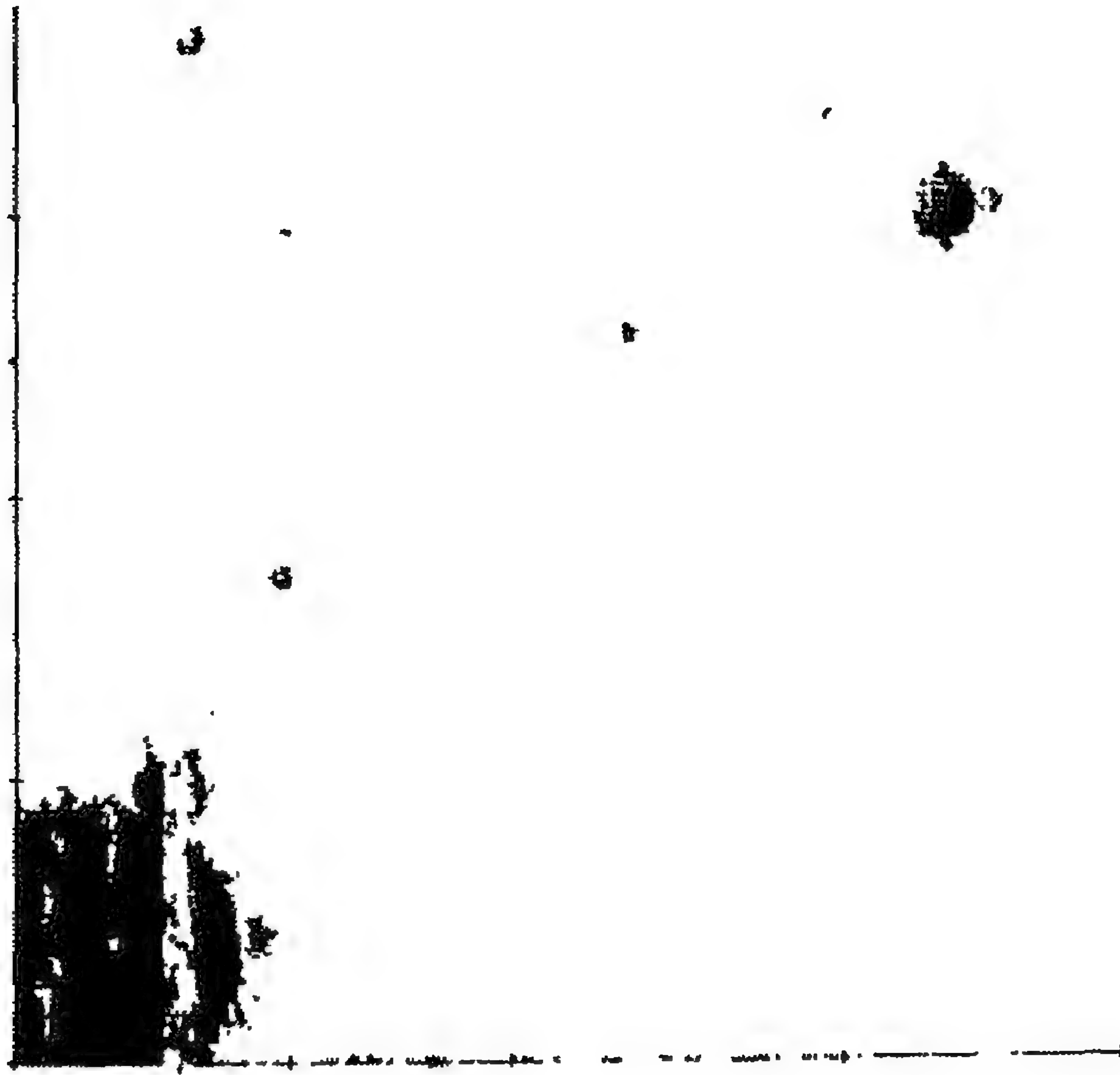
شكل ٨-٢: تصنيف فئات جوليا

انكب هبارد على دراسة هذه الأشكال المعقدة ومضامينها على الرياضيات. وأصبح عمله وعمل زملائه في نفس الموضوع خطاً جديداً في اقتحام مشكلة النظم الديناميكية. لقد شعر أن وضع خرائط لطريقة نيوتن ليست إلا واحدة من عائلة لم تكتشف بعد من الصور التي تعكس تصرف القوى في العالم الواقعي. وكان ميشيل برانسلي يبحث عن عناصر أخرى من العائلة. أما بنوا ماندلبروت، وكما علما فيما بعد، فقد كان يبحث في الجد الأعلى لهذه العائلة، فيما أصبح معروفاً في العالم بأسره باسم فئة ماندلبروت Mandelbrot set.

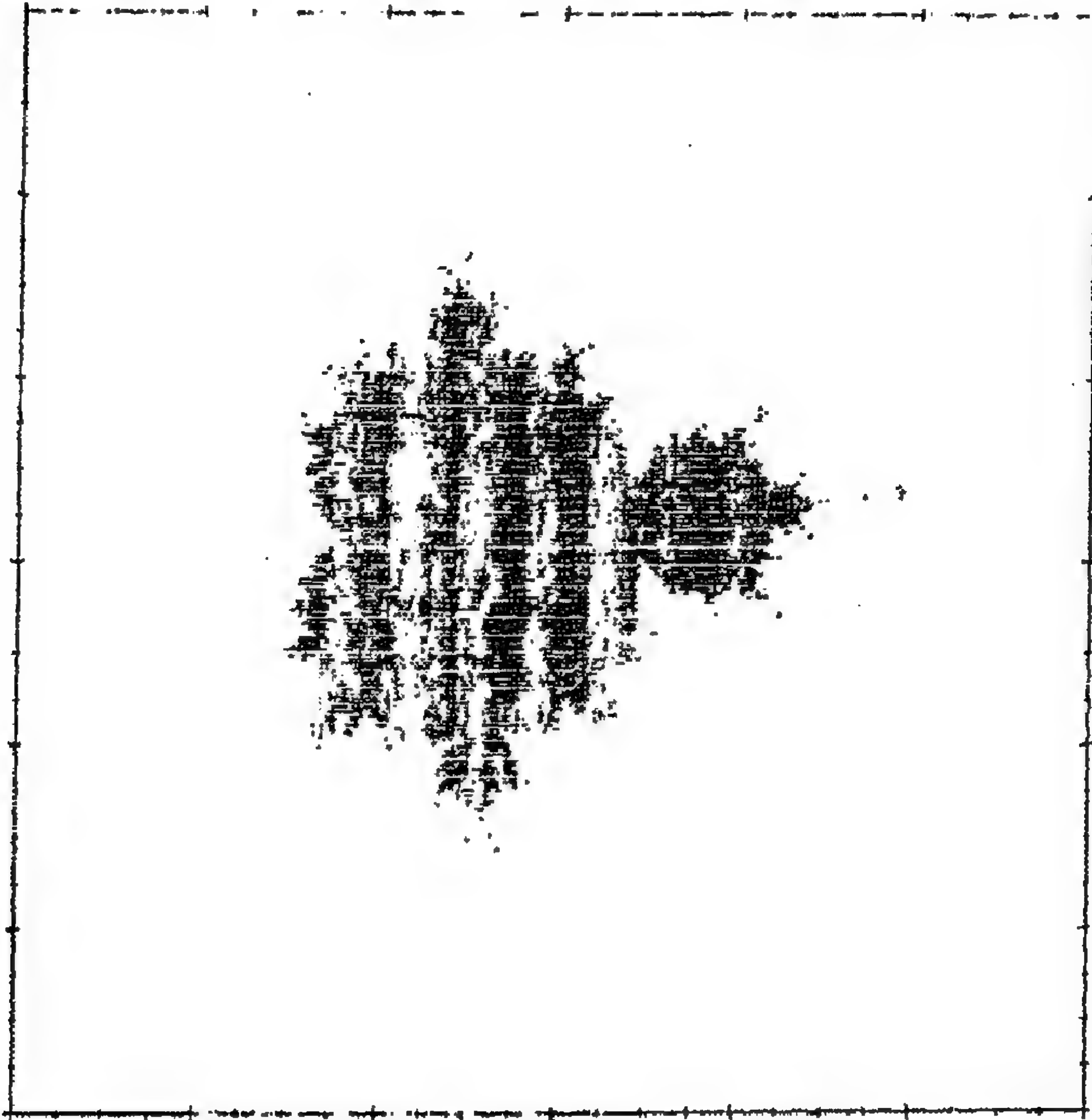
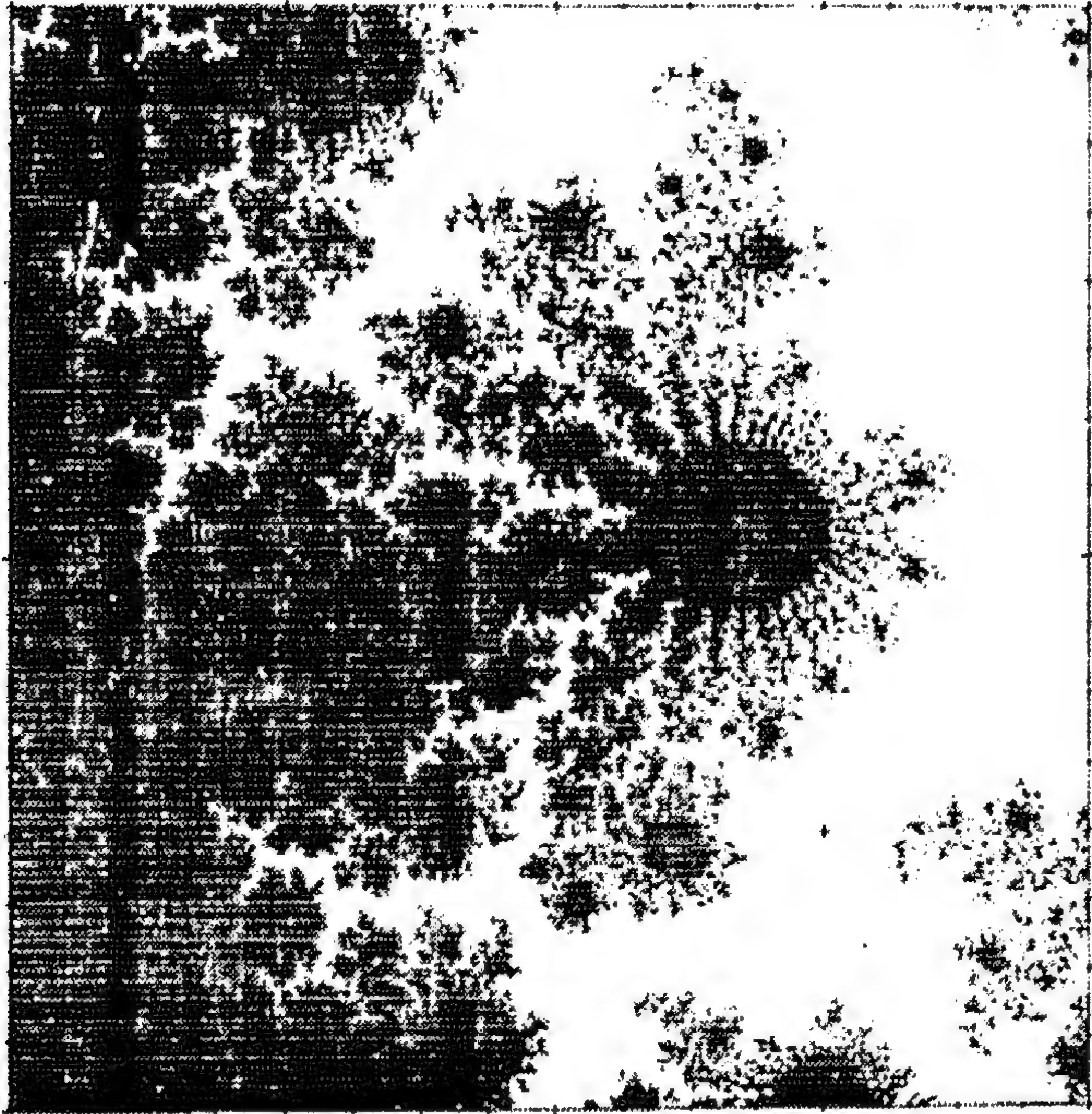


إن فئة ماندلبروت هي أعقد شيء في علم الرياضيات على الإطلاق، هذا ما يقرره على الدوام المغرمون بها، فعمر الكون قد لن يكون كافياً للكشف عنها بالكامل، بأقراصها ذات النتوءات الحادة، وحلزونات وفتائلها الملتفة حول بعضها البعض أو المتشعبة للخارج، تتدلى منها حبيبات مبرقشة بألوان لا تنتهي، كعناقيد عنب في حديقة ربانية. وينبئ الفحص الدقيق لأجزاء هذه الفئة عن أشكال أكثر فراكتلية من الفراكتلات ذاتها، غاية في الشراء في تعقدها كمّاً زادت المقاييس دقة. ويتطلب تصنيف الصور المختلفة داخلها أو الوصف الرقمي لحدودها كما لانهائياً من المعلومات. ولكن هنا مكن التناقض؛ فلإرسال الوصف الكامل للفئة عبر خط اتصال حاسوبي لا يتطلب الأمر سوى بضع عشرات من الحروفⁱⁱⁱ، فيمكن لبرنامج

حاسوبى مقتضب أن يتضمن معلومات وافية لإنتاج الفئة بأكملها. وقد فاجأ هذا التناقض بين التعقد الهائل والبساطة البالغة كل من تعرض لهذه الفئة بالدراسة، بما فيهم ماندلبروت نفسه. ولقد أصبحت هذه الفئة هي الشعار الشائع للهيولية، فتراها على أغلفة الكتب والكتيبات والمجلات التى تتعلق بالموضوع، وأصبحت حجر الزاوية لمؤتمر عالمى للفنون الجميلة الحاسوبية عقد عامى ١٩٨٥-٨٦، إن جمالها كان سهلا الإحساس به من هذه الصور، صعبا فهمه على الرياضيين الذين أخذوا يستوعبون مضمونها ببطء.



شكل ٣-٨ بزوغ فئة ماندلبروت: فى إخراج الحاسوب المبدئى لفئة ماندلبروت، يظهر شكل غير واضح الملامح، تزداد ملامحه وضوحا كلما أغرق الحاسوب فى إجراء الحسابات. هل هذه "الجزئيات" الطافية الشبيهة بحشرة البق جزر منعزلة، أم تراها تتجذب إلى الشكل الأصيلى بواسطة عناصر أدق من أن ترى؟ من المستحيل الرد على هذه الأسئلة فى الوقت الحالى.





والكثير من الأشكال الفراكتالية يمكن إنتاجها عن طريق التكرار في مستوى الإحداثيات للأعداد المركبة، ولكن فئة ماندلبروت هي فئة وحيدة لا يوجد غيرها. لقد بدأت في الظهور، غامضة شبحية، حين حاول ماندلبروت أن يجد وسيلة لتعميم فئة من الأشكال تعرف باسم فئات جوليا Julia set، درسها خلال الحرب الأولى اثنان من الرياضيين؛ جاستون جوليا Gaston Julia و بيير فاتو Pierre Fatou. وقد قرأ ماندلبروت عنها ودرس أشكالها المتواضعة، والغامضة، حين كان في العشرين من عمره. كانت هذه الفئة، مع شيء من التخفي، هي ما فتن برانسلي. بعض أشكال هذه الفئة أشبه دوائر خرقت وشوهت في عدة أماكن لتنتج أشكالاً فراكتالية، وبعضها الآخر مقسم على مناطق، والبعض الآخر أشبه بغبار متناثر، ولكن الهندسة الإقليدية لا تحمل كلمات أو مفاهيم تفي بوصفها. ويصفها الرياضي الفرنسي أدريان دودي Adrien Douady بقوله: "إنك تحصل على أشكالها الغريبة، البعض سحب متكاثفة، والبعض الآخر نباتات عشبية من العليق، وغيرها شرارات كتلك التي تتخلف بعد الألعاب النارية، وأحد هذه الأشكال على هيئة أرنب، والعديد منها على شكل ذيل فرس البحر."

وقد اكتشف ماندلبروت عام ١٩٧٩ أنه بإمكانه خلق شكل فى المستوى المركب يمكن أن يفى بغرض تصنيف تلك الفئة، كدليل لكل شكل ولكل إنسان. كان يبحث تكرار معادلات كثيرة، تحتوى على جذور تربيعية وجيوب وجيوب تمام. ورغم ما حققه لنفسه من شهرة فى وضع مفهوم البساطة المؤدية إلى التعقيد، فإنه لم يفهم وقتها مدى غرابة الشكل الذى يحوم تحت شاشة حاسوبه. وقد ضغط برامجه لدرجة أعلى من التفاصيل، وأجهداها فى العمل على ذاكرة كانت على وشك النضوب بالفعل، وشاشة بدائية غير ملونة. ومما زاد الأمر سوءاً، ما يحدث من تأثير لأخطاء الحاسوب نفسه على الأشكال الحادثة.

ثم وجه ماندلبروت اهتمامه إلى تطبيق^{iv} mapping بسيط كانت برمجته سهلة بصورة خاصة. وعند درجة فجأة من الدقة بدأت ملامح أقراص تظهر، وبحسابات بسيطة بالقلم بدا أنها حقيقية رياضية، وليست عشوائيات حسابية. وإلى اليمين واليسار من الأقراص، ظهرت علامات تنبئ عن أشكال أخرى. وقد قال فيما بعد أنه رأى بعين الخيال تدرجاً من أشكال، كذرات تنتج ذرات وهكذا بلا نهاية. وكلما تقاطعت الفئة مع خط الأعداد الحقيقية، تولدت الأشكال التالية من الأقراص بمقاييس رسم أصغر وبانتظام هندسى أصبح معروفا لعلماء النظم الديناميكية، إنها متواليات التفرعات لفايغنباوم.

وشجّعه ذلك أن ينزع لدرجة أعلى من الدقة، وعلى الفور لاحظ شوائب عالقة بأحرف الأقراص، وأيضاً متطايرة فى الفضاء المجاور. وحينما حاول الحساب بدرجات أدق، أحس فجأة بأن طالعه الحسن قد فارقه. فبدلاً من أن تصبح الأشكال أكثر تحديداً، بدت أكثر تشوشاً. وعاد إلى حاسوب شركة أى بى إم محاولاً مع قدرة حاسوبية أكبر من المتاحة لدى حاسوب هارفارد. ولدهشته أفصح التشوش عن شيء حقيقي. براعم وفريعات تتفرع عن القرص الأصلي، ورأى ماندلبروت ما كان يشبه حداً فاصلاً يكشف عن نفسه كطرونات أشبه بذيل حصان البحر.

إن فئة ماندلبروت هى مجموع من النقاط، وكل نقطة على المستوى المركب، أى كل عدد مركب، يكون إما فى الفئة أو خارجها، ويتحدد ذلك طبقاً لاختبار يجرى على النحو التالي: خذ العدد المركب، ارفعه للأس ٢، أضفه للعدد الأصلي، ارفع الناتج للأس ٢، وهكذا. فإذا كانت نتيجة التكرار ترتفع باطراد إلى ما لا نهاية، فالنقطة ليست من نقاط الفئة، أما إذا ظلت النتيجة عدداً محدوداً، كأن تقتنص فى دورة متكررة، أو تتأرجح عشوائياً، فإنها تكون من نقاط الفئة.

فى حالة الأعداد الطبيعية، لا يمثل اختباراً كهذا أية معضلة، فالأعداد الأكبر من الواحد الصحيح سوف تتصاعد إلى ما لا نهاية، والأقل من الواحد الصحيح (الأعداد الكسرية) سوف تؤول فى النهاية إلى الصفر. ولكن الأمر ليس بهذه السهولة مع الأعداد المركبة، فمعرفة الدالة ليس دائماً مفيداً فى توقع الشكل الناتج عن التكرار. لا مناص إذن من أسلوب التجربة والخطأ، وهذا يجعل المستكشفين لهذه الأرض الجديدة أقرب لروح ماجلان عن روح إقليدس.

إن وضع هندسة جديدة يكون عن طريق تغيير إحدى بديهيات الهندسة القديمة، إفتراض أن المستوى كروى وليس مسطحاً، أو أن الأبعاد أربعة أو خمسة أو أكثر، بدلاً من ثلاثة، أو أن عدد الأبعاد كسرى وليس صحيحاً، لنفرض أن الأشكال قابلة للمط والى والعقد. وأخيراً، لنفرض أن الأشكال لا تعرف عن طريق دوالها، بل عن طريق تكرار عملية التغذية الخلفية.

جوليا، فاتو، هابارد، بارنسلي، ماندلبروت، هؤلاء الرياضيون قد غيروا طريقة رسم الأشكال الهندسية. ففى الهندسة الإقليدية والكارتيزية، يعبر عن كل شكل عن طريق دالته الرياضية. فالدالة $s + 2$ ص $2 = 1$ تعبر عن دالة قطرها الوحدة، ومركزها نقطة الأصل. وهناك دوال للتعبير عن الأشكال الأخرى، القطع الناقص والقطع المكافئ والقطع الزائد، وأشكال أعقد من ذلك تنتج عن معادلات تفاضلية. ولكن حين يلجا الرياضى للتكرار لمعادلة ما بدلاً من حلها، فإن المعادلة تصبح عملية *process*، وليس وصفاً، أى ذات طبيعة ديناميكية وليست استاتيكية. وحين يدخل رقم فى المعادلة، يخرج رقم آخر، ويدخل ثالث، وهلم جرا. والنقاط تسجل ليس حين تحقق المعادلة، بل حين تنتج تصرفاً معيناً. وقد يكون التصرف هو حالة مستقرة، أو تكرار ترددي، أو انطلاق غير محكوم إلى اللانهاية.

وقبل ظهور الحاسوب لم يكن باستطاعة جوليا وفاتو، وهما من فهما هذه الإمكانية لتوليد الأشكال، تأسيس هذا العلم. ولما كان الحاسوب قادراً على تنفيذ الأعمال التكرارية بسهولة، فإن عملية التجربة والخطأ أصبحت ميسرة، وهو ما استغله هابارد فى فحص طريقة نيوتن، وماندلبروت فى اكتشاف ملامح فئته.

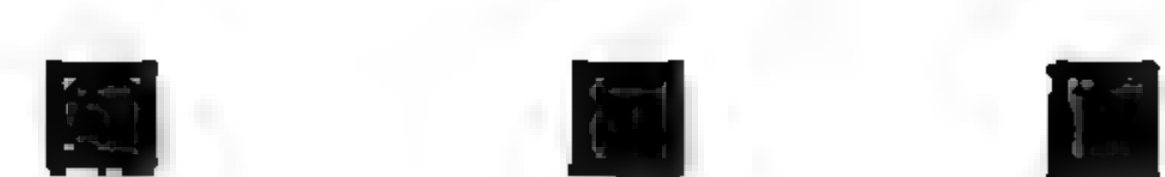
وحين رضى هابارد عن هذا الأسلوب الجديد فى استكشاف الأشكال بواسطة الحاسوب، أخذ على كاهله أن يتحمل تطبيق أسلوب رياضى مستحدث، وهو أسلوب تحليل الأعداد المركبة، وهو فرع من الرياضيات لم يطبق من قبل على النظم الديناميكية. كان يشعر بأنه قد آن الأوان للم شمل النظم المختلفة من العلم، وأن

المجالات المختلفة تتلاقى. إنه يعلم أنه ليس كافياً أن يشاهد أشكال فئة ماندلبروت، بل يجب أن يفهمها أولاً، وفي النهاية، ادعى أنه قد فعل.

لو أن الحدود كانت مجرد أشكال فراكتالية بالصورة التي عرفها بها ماندلبروت، لكان كل شكل تكرار تصغير للسابق عليه، تطبيقاً لمفهوم التماثل الذاتي. ولكن على النقيض من ذلك، يظهر كل اقتحام لعمق أشد غوراً الجديد من المفاجآت. وقد بدأ ماندلبروت يراجع نفسه إن كان قد وضع تعريفاً خاطئاً لأشكاله. كانت فئته تظهر بالفعل أشكالاً متطابقة تبدو نسخاً من الأصل الذي انبعثت منه، ولكن التدقيق فيها كان يبين أن التطابق ليس تاماً، حيث يظهر على الدوام أشكال جديدة من ذيل حصان البحر، وأنواع من عشيبات ملتفة جديدة. الواقع أنه ما من شكل يتطابق مع آخر، مهما بلغت درجة التكبير.

على أن الأشكال المتطابقة أثارت على التو مشكلة. هل أشكال هذه الفئة مترابطة، كقارة ذات امتدادات في البحر، أم أنها كالغبار المتطاير حول جسم ما؟ لم يكن الأمر واضحاً على الإطلاق. ولم تكن فئات جوليا لتقدم أى جواب على السؤال، لأن أشكالها تأتي على الوجهين، منها ما يمثل ذلك ومنها ما يمثل ذاك. ووجد ماندلبروت أن حاسوبه عاجز عن أن يقدم الإجابة. وركز النظر على الأشكال الدقيقة المتطابقة، لقد بدت منفصلة عن أصلها، ولكن الاحتمال قائم في وجود خطوط للوصل بينها تخطئها العمليات الحسابية.

وقد استخدم دودي و هبارد سلسلة بارعة من الرياضيات الحديثة لإثبات أن كل جزيئية متطابقة لها ارتباط بأصلها. كما أثبتا أنه ما من جزء متطاير إلا ويترك آخر مكانه، شبيهاً له، ولكن ليس في تطابق تام، وأن كل جزء جديد ينشأ محاطاً بخطوط اتصاله المتشعبة، تحمل في نهاياتها براعم الأشكال الجديدة. يالها من معجزة في عالم التصغير اللامتناهي!



قال هاينز-أوتو بايتجن Heinz-Otto Peitgen متحدثاً عن الفن: " كان كل شيء في الفن هندسياً للغاية، فأعمال جوزيف ألبرز مثلاً كانت مربعات متداخلة، الهدف منها إجراء تجارب لونية، وقد شاعت وقت ظهورها، ولكن لم يعد أحد يحبها اليوم. والآن، لم تعد البنايات النمطية ترضى الأنواق في ألمانيا. يلوح لي أن هناك سبباً عميقاً لذلك. إن المجتمع يكره اليوم بعض تصوراتنا عن الطبيعة. إن الحماس الطاغى الذي نقابله اليوم

له علاقة بالمنظور المختلف للطبيعة، والمضمون الحقيقي للأشياء الطبيعية. خذ الشجرة مثلاً، ما مضمونها، أخط مستقيم، أم أشكال فراكتالية؟

كان بايتجن يتحدث إلى زائر ليساعده على اختيار لوحة من لوحات فئة ماندلبروت أو فئات جوليا أو غيرها من إنتاج العمليات التكرارية المعقدة. وكان في مكتبه بكاليفورنيا يعرض شرائح، وملصقات، بل ونتيجة حائط لأشكال ماندلبروت. وفي نفس الوقت في كورنل، كان جون هبارد يكافح لتلبية مئات الطلبات لهذه الصور. لقد أدرك أن عليه أن ينتج عينات وقائمة أسعار لها لمواجهة الطلب المتزايد. وكانت الصور قد صُنفت بالفعل وخزنت في الحاسوب، استعداداً للإرسال الفوري. ولكن أدق وأجمل الصور كانت تأتي من اثنين ألمانيين، هاينز-أوتو بايتجن وبيتر ريختر Peter Richter، والطاغم المساعد من علماء جامعة بريمين، ومعاونة متحمسة من بنك محلي.

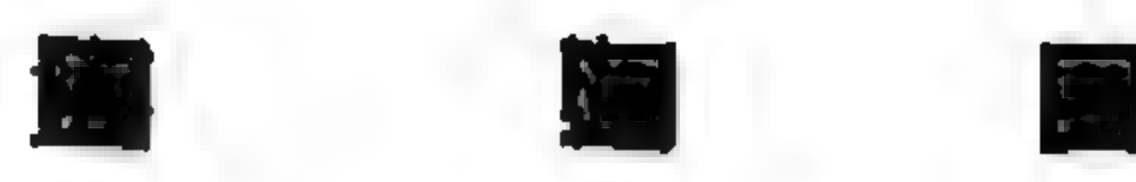
وجه بايتجن وريختر، أحدهما رياضي والآخر فيزيقي، نشاطهما إلى فئة ماندلبروت. كانت تمثل عالماً من الأفكار بالنسبة لهما؛ فلسفة حديثة للفن، تبرير لاستخدام الأسلوب التجريبي في الرياضيات، ووسيلة لتقديم النظم المعقدة للجماهير. طبعاً الكتب والكتالوجات، ورحلاً إلى مختلف بقاع الأرض مع مجموعة من صورهم الحاسوبية، كان ريختر قد تحول إلى النظم المعقدة من الفيزياء، عبر الكيمياء ثم الكيمياء الحيوية، يدرس الاهتزازات في البيولوجيا. وخلال عدة أبحاث نشرها عن نظام الوقاية في الجسم، وتحول السكر إلى طاقة عن طريق الخمائر، وجد أن الاهتزازات كثيراً ما تحكم عمليات كان ينظر إليها على أنها استاتيكية. كان يحتفظ في مكتبه لنموذج من بندولين، يطلق عليه نظامه الديناميكي الأليف، يحلو له بين الحين والآخر أن يدخله في طور الهولي، حيث تظهر فيه مدى الحساسية للظروف الأولية لدرجة أن بعض قطرات المطر على النافذة المعلق عليها تؤثر على حركته. وكانت الصور الملونة لفضاء الطور لنموذجيه تبين اختلاط الحركة الدورية بالهوليوية، كما كان يستخدم نفس التكنيك الرسومي لبيان مغنطة المواد، وكذا لاستكشاف أشكال فئة ماندلبروت.

وبالنسبة لزميله بايتجن كانت دراسة التعقيد فرصة لوضع تقاليد جديدة في العلم بدلاً من مجرد حل المسائل. ويقول عن ذلك، على أساس أن المجال الجديد سيكون غير نمطي: "في مجال جديد تماماً، يمكنك أن تفكر بحرية مطلقة، وقد تأتي بحلول جديدة في أيام أو أسابيع أو شهور قليلة. أما في المجالات التقليدية، فكل شيء معروف: ما كشف عنه، وما لم يكشف عنه بعد، وما حاول البعض كشفه ولم يؤد إلا إلى طريق

مسدود. عليك أن تتعامل مع مسألة معروفة على أنها تمثل مشكلة وأنها تستحق الدراسة، وإلا كتب عليك الضياع. وبالنسبة لما عرف أنها مشكلة، فيجب أن تكون صعبة، وإلا لكانت حُلَّت بالفعل.

وبطبيعة الحال شعر بايتجن كما شعر غيره من الرياضيين ببعض القلق حول استخدام الحاسوب كأداة للتجريب في مجال الرياضيات، والذي قوامه التقليدي هو النظرية والإثبات. فما يظهر على شاشة الحاسوب لا يمثل ضمناً بأنه يخضع إلى لغة الرياضيات هذه. ولكن من جهة أخرى، فإن مجرد إتاحة مثل هذه الصور يعتبر كافياً لتطور علم الرياضيات. ومن رأى بايتجن أن الاستكشافات الحاسوبية قد أعطت الرياضيين الحرية في اتباع طرق أكثر طبيعية. فعلى الرياضي أن يضع مؤقتاً قضية البرهان جانباً، وأن يتبع الاستكشاف في أى مسار يتخذه، بالضبط كما يفعل الفيزيائي. إن القدرة التحليلية الرقمية للحاسوب، وما تقدمه الصور الحاسوبية من إلهامات، إمكانيات تعد بمسارات رحبة للرياضيين، تتلافى الطرق المسدودة. وبعد أن يستخلص الرياضي من ذلك ما يشاء، يمكن له ، أو لغيره، أن يعود لقضية الإثبات، أو ربما يتاح ذلك في جيل تال. الإثبات قضية جوهرية في الرياضيات، نعم، ولكن ليس إلى الحد الذي يجعلنى أتخلى عن شيء الآن، لمجرد عدم مقدرتى على إثباته.

بحلول الثمانينات، أصبح الحاسوب الشخصى قادراً على القيام بالعمليات الحسابية بدقة تتيح إنتاج الصور الملونة للفئة، الأمر الذى استهوى العديد من الهواة، إذ انفتحت أمامهم إمكانيات هائلة للدقة. فإذا كان الشكل على مستوى كوكب فى أبعاده مثلاً، فإنه بإمكانك أن تنتج له صورة على هذا المستوى، أو على مستوى قارة، أو دولة، أو مدينة، أو منزل، أو غرفة، أو منضدة، أو كوب ماء، أو قطرة ماء، أو جزيء من الماء، أو بحجم بكتيريا، أو بحجم ذرة. وكل مستوى يبدو متشابهاً مع المستوى الأعلى، ولكن التشابه ليس تاماً. وكل المستويات تنتج بعدد محدود من أسطر البرامج الحاسوبية.

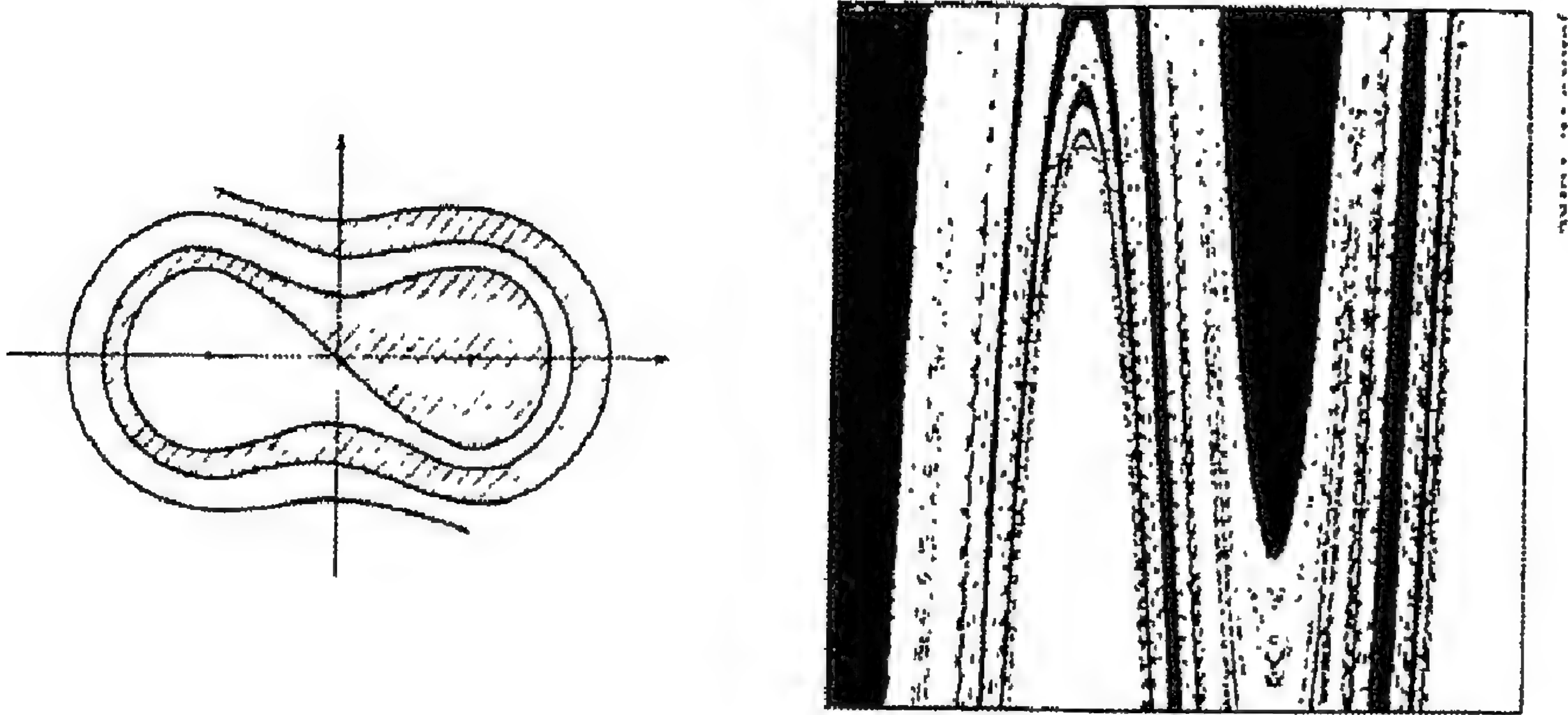


فى فئة ماندلبروت، يقضى الحاسوب أكثر وقته عند الحدود فى إجراء الحسابات والتقريبات. فهناك، وبعد مائة، أو ألف، أو عشرة آلاف من التكرار، يظل غير متأكد من أن النقطة لا تنتمى للفئة، فمن يدرى ما الذى تنتجه الدورة المليون من الحساب؟ ولذا فإنه كلما كبرت درجة الدقة، كان الاحتياج إلى قدرة أكبر من الحاسوب. وبعد مرحلة معينة، يكون الاحتياج إلى حواسيب فائقة القدرة، تعتمد على المعالجات المتعددة،

كالحاسبات الإيوانية mainframe أو محطات العمل workstations، والتي تعادل ألافاً من العقول البشرية تعمل مجتمعة في إجراء نفس الخطوة. وعند الحدود توجد دائماً النقاط التي تفر من قبضة الفئة، فهي أشبه بمن وقع تحت تأثير جذب لقوى متعادلة، تفشل أى منها في جذب النقطة إليها.

وحين يتحرك العلماء من فئة ماندلبروت ذاتها إلى تمثيل الظواهر الفيزيائية، تبرز خصائص الحدود إلى المقدمة. فالحدود بين جاذبين أو أكثر في نظام ديناميكي تمثل منطقة عامة يبدو أنها تحكم العديد من الظواهر، من تحطم المواد إلى اتخاذ القرارات. كل جاذب في هذه النظم له حوض، كالنهر الذي يلقي كل ما استطاع حمله إلى حوضه أو مصبه. وتوجد بين أحواض الجاذبات حدود مشتركة. وفي الثمانينات، كانت أهم الأبحاث وأكثرها تأثيراً على الخط العلمي في الرياضيات والفيزياء هي دراسة الخصائص الفركتلية فيما بين الحدود.

هذا الفرع من الدراسات الديناميكية لا يهتم بالحالة النهائية للنظام، بل بالطرق التي تتخذها النظم في الاختيار بين البدائل. فنموذج لورنز، الذي غدا كلاسيكياً، له جاذب وحيد، تصرف وحيد حين يستقر النظام، وهو جاذب هيولي. وقد تستقر بعض النظم على حالة غير هيولية، بل حالة ثابتة، قد يكون هناك احتمال لأكثر من حالة ثبات، يمكن للنظام أن يستقر عليها. ودراسة الخصائص الفركتلية عند الحدود هي دراسة للنظم التي يمكنها أن تستقر على أكثر من تصرف ثابت، أى غير هيولي، وكيفية التنبؤ بالتصرف الذي سوف يستقر عليه النظام.



شكل ٨-٣ أحواض الحدود الفركتلية: حتى وإن كان تصرف النظام الديناميكي على المدى الطويل ليس هيولياً، فإن الهيولية يمكن أن تظهر في الحدود بين حالة ثبات

والأخرى. فالنظم الديناميكية لها عادة أكثر من حالة اتزان، كالبندول الذي يمكنه أن يستقر عند أى من مغناطيسين موجوبين على قاعدته. فكل وضع توازن يعتبر جاذبا، والحدود بين هذه الجاذبات يمكن أن تكون معقدة، ولكن فى سلاسة (يسار). كما يمكن أن تكون الحدود معقدة فى غير سلاسة، فالتداخل الفراكتلى شديد التعقد للونين الأبيض والأسود (يمين) هو شكل فضاء الطور لبندول. ومن المؤكد أن النظام سوف يصل لحالة ثبات، وبالنسبة لبعض المواضع الابتدائية فإن موضع الاستقرار يكون متوقعا، الأبيض يؤول للأبيض والأسود للأسود، ولكن عند الحدود يكون التوقع مستحيلا.

وقد اقترح جيمس يورك، الرائد فى دراسات الخصائص الفراكتلية عند الحدود بعد عقد من إعطائه علم الهيولية اسمه الرسمى، نظاما لآلة تخيلية، تحتوى على كباس ذى زنبرك. يقوم اللاعب بسحب الكباس ثم إطلاقه، فيدفع بكرة على مجرى مائل إلى أحد مخرجين.

هذا نظام تحديدي، ليس له إلا عامل واحد يحدد النتيجة - إلى أى مخرج تتجه الكرة - وهو الوضع الابتدائى للكباس. لو تصورنا أن السحب لأقل من مسافة معينة يؤدى للمخرج الأيمن، ولأكثر من مسافة معينة يؤدى للمخرج الأيسر، فإن السحب لمسافة تقع بين المسافتين سوف يجعل تصرف الكرة فى اختيارها لأى من المخرجين معقدا.

لنفرض أننا مثلنا النتائج رسوميا، على هيئة نقاط ملونة بحسب المخرج الذى تنتهى إليه، ما ينتهى إلى اليمين أخضر، وإلى اليسار أحمر. ما الذى نتوقع أن نجده عن هذين الجاذبين بمعرفة الوضع الابتدائى؟

تظهر الحدود كقئة فراكتلية، ليست بالضرورة متماثلة ذاتيا، بل تستمر تفاصيلها إلى ما لا نهاية. بعض المناطق تكون ملونة بلون أحمر خالص أو أخضر خالص، وفى مناطق أخرى، عند تكبيرها، تظهر لونا أحمر وسط مناطق خضراء، أو العكس. فى بعض المناطق لا يكون للتغير فى وضع الكباس أثر، وفى مناطق أخرى يكون لأدنى تغير أثره فى التحول من الأحمر للأخضر

إن إضافة بعد ثان للنظام يعنى إضافة معامل آخر، درجة ثانية من الحرية. وفى لعبتنا التخيلية سنجعل العامل الثانى هو ميل المجرى. هنا سندخل فى صورة من التعقيد تمثل كابوسا للمهندسين المسئولين عن استقرار النظم التى تحتوى على أكثر من معامل استقرار، كالشبكات الكهربائية مثلا، أو محطات المفاعلات النووية، وكلا المجالين كان موضع دراسات مكثفة عن الهيولية فى الثمانينات.

عقد يورك مؤتمرات لبيان التصرفات الفراكتلية عند الحدود. بعض الصور كانت تبين تصرفات البندولات ذات الحركة القسرية forced motion، والتي يمكن أن تنتهي إلى إحدى حالتى ثبات. هذا النموذج يمثل، كما يعرف مستمعوه جيدا، الحركات الاهتزازية بصفة عامة، والتي تشاهد فى أكثر من صورة فى الحياة الواقعية. لإنتاج هذه الصور، قام حاسوبه بمسح شبكة من ألف نقطة فى ألف نقطة، كل نقطة تمثل موضعا ابتدائيا للبندول، ويحسب لكل نقطة نتيجتها، وتخرج النتيجة على لونين، أبيض وأسود، يمثلان حوضى التجاذب، مختلطين ومطويين بمعادلات نيوتن المعتادة، وكانت نسبة نقاط الحدود أكثر مما يتوقع؛ ففي المعتاد، كان أكثر من ثلاثة أرباع النقاط الموقعة تقع على الحدود.

بالنسبة للمهندسين والباحثين، كانت هذه الصور تمثل درسا، وتحذيرا. ففي كثير من الأحوال، يكون من الواجب تخمين المنطقة الفعالة للنظم المعقدة عن طريق عدد محدود من البيانات. فحينما يتصرف نظام بصورة عادية، مستقرا فى نطاق ضيق من العوامل، يقوم المهندسون بعمل ملاحظاتهم، محاولين توسيع نطاق هذا الاستقرار بطريقة خطية، أملين أن تنجح محاولتهم. ولكن العلماء الذين يدرسون مسألة حدود الأحواض الفراكتلية قد بينوا أن الفرق بين التصرف المستقر والكارثة قد يكون أعقد مما يمكن لأحد أن يتصوره. يقول يورك: "إن الشبكة الكهربائية فى مجموعها نظام مهتز، ولكنه مستقر فى أغلب الأوقات. ويريد المهندسون أن يعرفوا تصرفها عند الاضطراب، والحدود بين استقرار الشبكة وانهارها. والواقع يبين أنهم ليس لديهم أدنى فكرة عما تكون هذه الحدود عليه."

وتخاطب حدود الأحواض الفراكتلية مواضيع عميقة فى الفيزياء النظرية. فالتحول الطورى مسألة متعلقة بالحدود، وقد نظر بايتجن وريختر فى أفضل مسألة للتحويل الطورى تمت دراستها، مغنطة المواد. أظهرت صورهم أشكال الحدود بين المغنطة واللامغنطة، بتعقيداتها المثيرة وألوانها الزاهية. وحين بدءا فى زيادة العوامل ودرجة الدقة، أخذت الصور تتجه أكثر وأكثر إلى العشوائية، وعلى حين غرة، إذا بالشكل المفلطح المألوف، بنتوءاته وتشعباته، يخرج من الأعماق، إنها فئة ماندلبروت. ولقد كتبوا آنذاك: "ربما يجدر بنا أن نؤمن بالسحر."



شق ميشيل برانسلى لنفسه طريقا آخر. فقد فكّر فى صور الطبيعة، خاصة النماذج التى تنتجها الكائنات الحية. وقد اختبر فئات جوليا، وجرب غيرها من العمليات، باحثا

عن طرق تنتج المزيد من التغيرات. وأخيرا، اتجه إلى العشوائية كأساس لتكنيك جديد لنمذجة أشكال الطبيعة. وحين كان يكتب عن هذا التكنيك، كان يسميه "التركيب الشامل للفركتلات، عن طريق النظم ذات المعادلات المتكررة *The global construction of fractals, by means of iterated function systems* على أنه حين كان يتحدث عنه، كان يطلق عليه لعبة الهولوية *The chaos game*".

ولإجراء اللعبة الهولوية بسرعة، يجب أن يكون لديك حاسوب بشاشة ملونة ومولد أرقام عشوائية. على أن الفكرة يمكن إجراؤها من حيث المبدأ بواسطة قلم وورقة وقطعة عملة. اختر نقطة على الورقة، كيفما اتفق، ثم الق بالعملة. ضع قانونين، واحد لحالة ظهور الكتابة، والآخر لحالة ظهور الصورة. لنقل: إذا ظهرت الكتابة، انتقل بوصتين إلى الشرق، وإذا ظهرت الصورة، اتجه إلى نقطة المركز، بربع المسافة بين النقطة وبينها. لدهشتك، سوف ترى أن النقاط المرسومة مع التقدم في اللعبة لا تنشئ حقلا مليئا بالنقاط العشوائية، بل شكلا يزداد وضوحا مع تقدم اللعبة.

كانت رؤية برانسلي على النحو التالي: فئات جوليا وغيرها من الأشكال الهولوية، والتي ينظر إليها كنتاج للعمليات التحديدية، وهي نظرة صائبة، لها أيضا وجه آخر في الوجود؛ كوضع نهائى للعمليات العشوائية.

وقد استخدمت اللعبة الهولوية أحد الخواص الفراكتلية لبعض الصور، خاصية أنها نتاج نسخ أصغر من الصورة الأصلية. إن عملية كتابة قوانين يتكرر تطبيقها عشوائياً تحمل في طياتها المعلومات العامة لإنتاج شكل ما، وتكرار تطبيق القوانين يفرز هذه المعلومات، دون النظر إلى مقياس ما. وكلما كان الشكل أكثر قربا من الفراكتالية، بهذا المعنى، كانت القوانين المناسبة أبسط.

وسرعان ما وجد برانسلي نفسه قادرا على إنتاج كافة الصور التي يتضمنها كتاب ماندلبروت-الذى أصبح يعد كلاسيكيا-من أشكال فراكتالية، فتكنيك ماندلبروت كان عددا لانهائيا من التكرار والتدقيق. فلإنشاء منحني كوخ لكسفة الثلج، يمحو المرء جزءا من الخط ويستبدل به شكلا ما. أما عن طريق اللعبة الهولوية لبرانسلي، فإن الصور تبدو مهزوزة الملامح، ثم تتضح ملامحها بالتدريج. ليس هناك من داعٍ لعمليات التدقيق، فقط مجموعة من القواعد التي تتضمن بطريقة ما الشكل النهائى.

وانكب برانسلي ومساعدوه على برنامج لإنتاج الصور المختلفة، من النباتات أو من التراب أو من الطين. كان السؤال الجوهرى هو كيفية استنباط القواعد اللازمة للوصول

إلى شكل معين. كانت الإجابة، والتي أطلق عليها "نظرية الملصقات collage theorem" من البساطة بحيث يشعر المرء أن في الأمر خدعة. لتبدأ برسم الشكل الذي تريد أن تعيد إنتاجه، وقد اختار برانسلي إحدى أوراق الشجر لتجربته. بعد ذلك استخدم الفارة لوضع نسخ مصغرة على الشكل حتى تغطيه، تاركا إياها تتراكب فوق بعضها البعض إذا لزم الأمر. وحين يكون الشكل فراكتاليا بدرجة كبيرة، فإن عملية التغطية تتم بصورة أسهل، ولكن على درجة معينة من التقريب، فإنه يمكن تغطية جميع الأشكال.

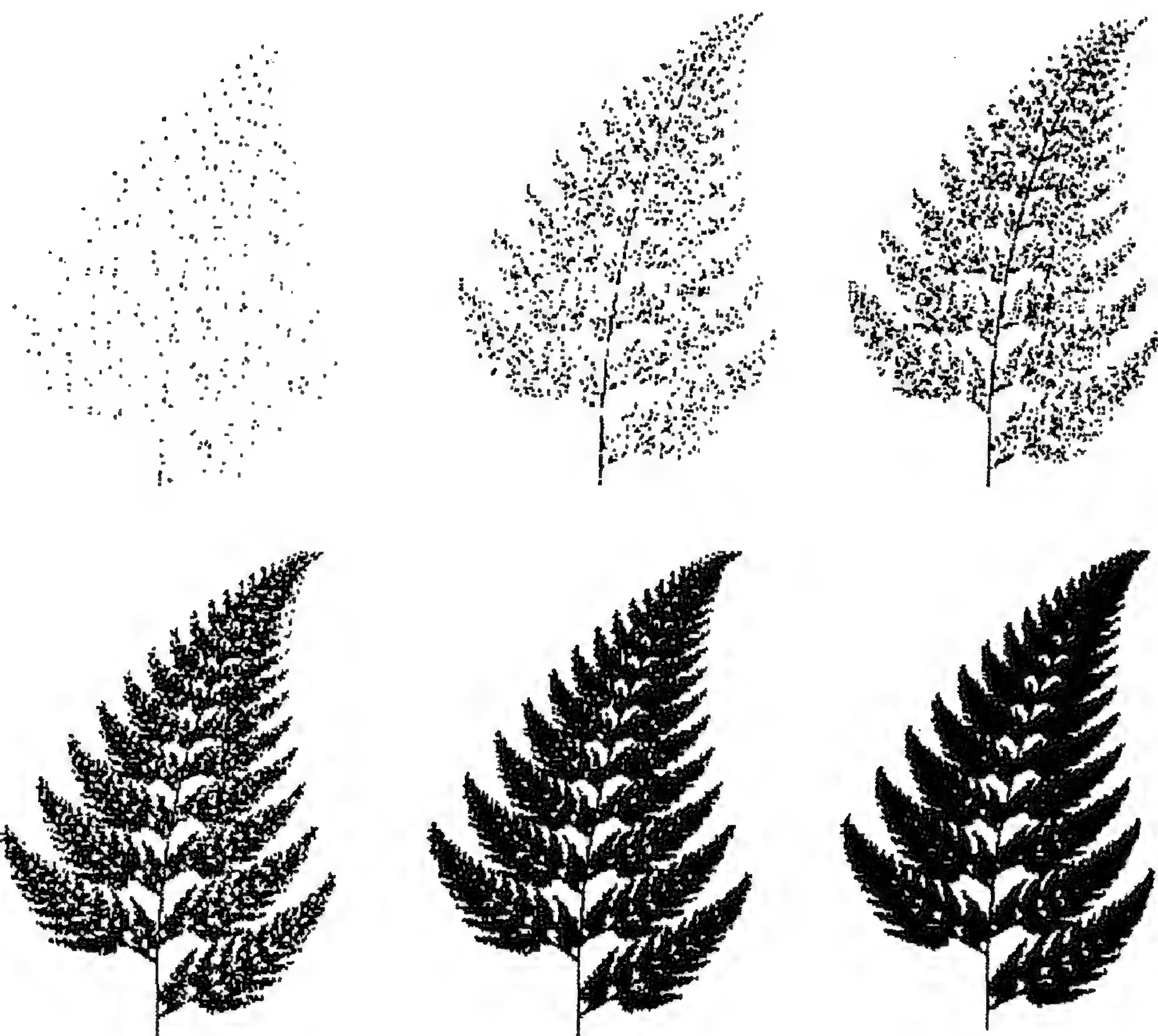
يقول برانسلي: "إذا كان الشكل معقدا، فإن قوانينه سوف تكون معقدة. أما إذا كان الشكل يتضمن خاصية فراكتالية بداخله فقد لاحظ ماندلبروت أن أغلب أشكال الطبيعة تحوى هذه الخاصية المختبئة-فإنه يمكن بقوانين بسيطة تكويدها. مثل هذا النموذج أكثر إثارة من نموذج إقليدس، لأننا جميعا نعلم أن حرف ورقة الشجر ليست خطا مستقيما."

ويجادل برانسلي في أن الطبيعة تلعب بالفعل صورة من اللعبة الهيولية خاصة بها. "لن يكون مستغربا أن تكون هناك معلومات من هذا القبيل تحكم نمو أوراق الشجر، بل المستغرب ألا يكون الأمر كذلك."

ولكن، هل الصدفة مطلوبة؟ لقد فكر هبارد أيضا في وجود توازن بين فئة ماندلبروت وتكويد المعلومات البيولوجية، ولكنه كان يقف موقفا عدائيا ضد أية فكرة توحى باعتماد ذلك على الصدفة. "ليس في فئة ماندلبروت أى مكان للصدفة، ولست أرى أية إمكانية لوجودها في عالم البيولوجيا. إن كل شيء مهيكلك بكل دقة، وإنى لأتخيل اليوم الذى يأتى فيه أحد وقد اكتشف تكويد كيفية بناء المخ بكل ما هو عليه من تعقيد ودقة."

على أنه في تكنيك برانسلي تدخل الصدفة كأداة فقط. فالنتائج محددة وقابلة للتنبؤ بها. أما ومضات النقاط على شاشة الحاسوب، فليس لأحد أن يخمن متى تكون الومضة التالية، إذ يعتمد ذلك على ما يفعله مولد الأرقام العشوائية بالجهاز. ولكن الومضات تقوم، بطريقة ما، بتخليق الصورة النهائية. يقول برانسلي: "إن للصدفة دورها المبدئى، ولكن الكائن الفراكتلى ذاته لا يعتمد على الصدفة بأية حال من الأحوال. فأنت حين تستكشف كائنا فراكتليا بخوارزم عشوائى، تكون كمن تدخل غرفة مظلمة، فأخذت عيناه تحومان في عشوائية في الظلام. بعد فترة يأخذ فكرة عن الأشياء في الغرفة، ولكن الأشياء ذاتها موجودة حقيقة لا علاقة لها بما يفعله الشخص الداخل."

كذلك فإن فئة ماندلبروت موجودة. كانت موجودة قبل أن يحولها بايتجن وريختر إلى فن، وقبل أن يفهم هبارد ودودي أساسها الرياضى، بل قبل أن يكتشفها ماندلبروت نفسه. لقد وجدت بمجرد أن وضع العلم أدواتها، الأعداد المركبة والمعادلات التكرارية، ثم قُبعت منتظرة أن يكشف عنها النقاب. أو ربما هى موجودة قبل ذلك، منذ أن بدأت الطبيعة فى تنظيم نفسها طبقاً لقوانين فيزيائية بسيطة، تكررهما فى صبر ما لا يحصى من المرات، بنفس الطريقة فى كل مكان وكل أن.



شكل ٨-٤ اللعبة الهيولية: تتساقط النقاط تسقط عشوائياً، ولكن شكل ورقة الشجر تظهر تدريجياً، وكل المعلومات الضرورية تجدها مكوّدة فى قواعد بسيطة.

- i الخوارزم هو الخطوات المنطقية لحل مسألة حاسوبية، تمهيدا لوضع برنامج حاسوبي لها- المترجم
- ii يرجع إلى اللوحة الملونة لفهم الموضوع بالتفصيل. المترجم
- iii المحارف character (جمع محرف) هو كل ما على لوحة المفاتيح من رموز يمكن تكويدها حاسوبيا، وهي بالإضافة للحروف الأبجدية المعتادة letters والأرقام تشمل الرموز الخاصة كعلامات التعجب والاستفهام والرموز الحسابية والأقواس الخ.- المترجم
- iv عملية التطبيق هي عملية تحويل رياضية. المترجم
- v يقول بايتجن في كتاب له أن معرضه عن هذه الأشكال قد جذبت مائة وأربعين ألف مشاهد في خلال سنتين - المترجم

جماعة النظم الديناميكية

كانت سانتا كروز Santa Cruz هي أحدث كلية تتبع جامعة كاليفورنيا، يقول الناس إنها أشبه بحديقة عامة عنها بكلية، فمبانيها غائصة بين الأشجار، وقد راعى المنفذون قدر استطاعتهم ترك الأشجار في أماكنها. وقد افتتحت الكلية عام ١٩٦٦، وسرعان ما أصبحت تضم الصفوة من رجالات الجامعة. وكان قسم الفيزياء يضم خمسة عشر من الفيزيائيين الشبان الممثلين حماسا، منفعلين بالحرية الفكرية التي كانت هي الموجة السائدة آنذاك، معتقدين بأهمية الجدية وترسيخ المبادئ.

كان أحد طلاب الدراسات العليا الذين لا شك في جديتهم هو روبرت شو Robert Show. من بوسطون وخريج لهارفارد، يبلغ حين التحق بالكلية عام ١٩٧٧ اثنين وثلاثين عاما. وقد كان تخرجه أكبر بقليل من أقرانه، حيث اعترض مسار دراسته خدمة التجنيد وأمور أخرى. لم يكن يعلم لماذا أتى إلى سانتا كروز، إذ لم يكن قد رآها من قبل، اللهم إلا في كتيب يشير إلى تنفيذ فلسفة جديدة في التعليم. كان شو هادئ الطباع خجولا بقدر كبير، طالب مجد على بعد خطوات من الحصول على درجة الدكتوراه في التوصيل الفائق. لم يكن أحد يعنيه أنه يهبط إلى الطابق السفلي كثيرا، ليلهو بالحاسوب هناك.

كان الأساتذة يستخدمون طلبة الدراسات العليا للمساعدة في الأبحاث وفي إجراء الحسابات، وفي المقابل يحصلون على جزء من مبلغ المنحة الدراسية وعائد نشر الأبحاث. وحين تكون العلاقة طيبة بين الأستاذ ومساعدته، فإنه يساعد على اختيار مواضيع مثمرة وطيدة، وقد يساعد أيضا على الحصول على وظيفة، وكثيرا ما كان اسماهما يظللان مرتبطين طوال العمر. وفي عام ١٩٧٧ لم تكن الهيولية موضوعا من موضوعات الدراسة، لم تكن قد انشئت بعد مراكز لدراسات النظم غير الخطية وأبحاث النظم المعقدة، ولا مراجع أو حتى مجلات علمية في هذا العلم، حيث لم يكن لهذا العلم وجود بعد.



التقى ويليام بروك William Burke أستاذ الفلك والنسبية في سانتا كروز بصديقه إدوارد شبيجل Edward Spiegel أستاذ الفيزياء الفلكية بجامعة كولومبيا في الواحدة صباحاً في قاعة استقبال فندق بوستون هوتيل، حيث كان مؤتمر عن النسبية منعقداً، فبادره شبيجل بالقول: "مرحباً، لقد سمعت لتوى عن جاذب لورنز"، وسحب صديقه للبار لتناول مشروب وشرح ما يقصد.

كان شبيجل يعرف لورنز شخصياً، ويسمع عن الهيولية منذ الستينيات، ونو شغف باصطياد أصدقائه لإخبارهم بأخر الأنباء العلمية. وفي تلك الليلة كان بروك هو صيده.

وكان بروك بدوره منفتحاً لمثل هذه الأمور، وقد بنى لنفسه شهرة من خلال البحث في أحد الأمور العويصة التي نبتت عن النسبية، موجات الجاذبية gravity waves. كانت مشكلة عالية اللاخطية، تثير تصرفات شاذة على غرار مشاكل اللاخطية المشاغبة في ديناميكا الموائع. كما كانت مشكلة نظرية عالية التجريد، ولكن بروك كان مغرماً بالمسائل المرتبطة بالواقع، يحب أن يقول عن نفسه إنه ينتمي إلى جيل منقرض، يعتبر الفيزياء موضوعاً واقعياً. والأكثر من ذلك، فهو قد قرأ مقال ماى فى "الطبيعة"، والذي يناشد فيه العلماء ببذل المزيد فى مجال أبحاث اللاخطية. كما أنه بدوره قد قضى بضعة ساعات يتلاعب بمعادلات ماى مستخدماً آتله الحاسبة. ومن ثم فقد بدا موضوع جاذب لورنز جذاباً، واشتد شوقه لأن يراه. وبمجرد عودته إلى سانتا كروز، أعطى شو معادلات لورنز الثلاث، سائلاً إياه إن كان بإمكانه وضعها على الحاسوب.

كان الحاسوب فى سانتا كروز موجوداً بسبيل الصدفة فقط، إذ كانت النية متجهة لإنشاء كلية للهندسة، ثم أُلغى القرار، ولكن الحاسوب كان قد تم توريده. كان من طراز عتيق، ذى لوحة مفاتيح تماثل الستترالات (البدايات) التليفونية اليدوية فى سالف الزمان، خليط من أسلاك التوصيل والمقابس والقابسات. وكانت برمجة الحاسوب تتم عن طريق عمل توصيلات على لوحة المفاتيح هذه لتشكيل دوائر إلكترونية يتم التحكم فيها عن طريق المقابض الدوارة. وكانت الدوائر الإلكترونية هوائية لدى شو.

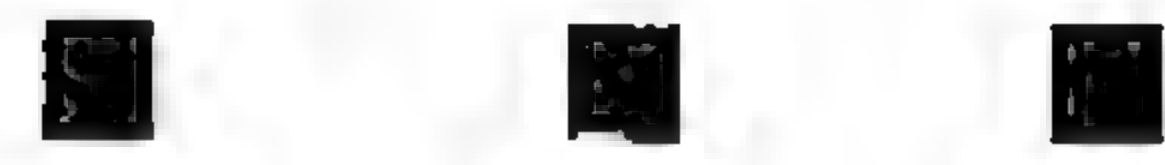
وعن طريق التلاعب بمكونات الدوائر وقيمها، كان باستطاعة المبرمج تمثيل المعادلات التفاضلية بأسلوب يوافق متطلبات المسائل الهندسية. فتمثيل الاهتزاز فى السيارة يتم بدائرة تحتوى على ملف كهربي يمثل كتلة السيارة، ومكثف كهربي يمثل الزنبركات، بينما تمثل المقاومة الكهربائية الاحتكاك. وعن طريق المقابض الدوارة يمكن تغيير معاملات الدائرة، فتجعل الزنبرك أقوى شداً أو الاحتكاك أقل قيمة. وعلى شاشة الحاسوب يكون بإمكانك أن ترى النتيجة على الفور، تأثير التغيير على طبيعة الاهتزاز.

فى الطابق العلوى؁ حيث معمل الفيزياء؁ كان على شو أن يقضى الساعات لإنهاء رسالته فى التوصيل الفائق. ولكنه كان يقضى بعضاً من الوقت مع الحاسوب العتيق؁ وقد رأى قضاء الطور لبعض من المعادلات لنظم بسيطة؁ كتمثيل لمسارات دورية. لو كان قد صادف الهولوية؁ متمثلة فى جاذب عجيب؁ لما كان بإمكانه التعرف عليها بكل تأكيد.

لم تكن المعادلات الثلاث المكتوبة على قصاصة من الورق تمثل مشكلة لشو فى برمجتها على الحاسوب؁ فما هى إلا بضع ساعات وكانت الدوائر قد شكلت؁ والمقايض قد وضعت فى أوضاعها الصحيحة. وبعد عدة دقائق من تشغيل الحاسوب؁ أيقن شو أن رسالة الدكتوراة فى مجال التوصيل الفائق لن يُقدر لها أن تقم!

قضى شو عدة ليال فى الطابق الأرضي؁ يشاهد النقطة الخضراء تحوم على شاشة الحاسوب؁ تدور وتدور راسمة قناع البومة لجاذب لورنز. كان تدفق الشكل يظل عالقا على شبكية عينيه؁ شيء وامض مرتعش؁ ليس كأى شيء صادفه فى أبحاثه. كان يبدو لعينيه حياة قائمة بذاتها تأسر اللب. نماذج تتوالى دون أن تكرر نفسها أبداً؁ كما يفعل اللهب تماماً. سرعان ما اكتشف مفهوم الحساسية للظروف الأولية التى أقنعت لورنز بعدم جدوى التنبؤ بالطقس على المدى البعيد؛ فقد كان يغير من أحد العوامل؁ ويضغط ضاغط تشغيل الحاسوب؁ فينطلق الجاذب؁ ثم يكرر التجربة؁ متحريراً أن تكون بنفس الظروف؁ بقدر ما تتيحه دقة القوابض المتحركة؁ ولكن هيهات؁ إن الشكل الناتج لا علاقة له بالسابق بالمرّة؁ ولكنه ينتهى على الدوام إلى نفس الجاذب.

كان لدى شو منذ نعومة أظفاره تصوُّر عن العلم؛ انطلاق جسور فى عالم اللامجهول؁ وكان ما يفعله الآن متفقاً بالضبط مع هذا التصور. وأخيراً انتقل الحاسوب إلى غرفة شو بالدور العلوي؁ ولم تعد الغرفة مستخدمة فى مجال التوصيل الفائق بعد ذلك.



قال رالف إبراهيم Ralph Abraham أستاذ الرياضيات لمستعميه حين جاء فى الأيام الأولى ليُشاهد جاذب لورنز حياً على شاشة الحاسوب: " كل ما عليك أن تفعله هو أن تضع يديك على هذه القوابض؁ وفجأة تجد نفسك مستكشفاً عالماً لم يرتده أحد من قبلك؁ لا تريد العودة منه." كان إبراهيم مع ستيف سميل فى أيام المجد الخوالى فى بركلى؁ ومن ثم فقد كان من القلائل فى سانتا كروز ممن لديهم خلفية تمكنهم من فهم

ما يجرى على الشاشة. كان انطباعه الأولي هو الدهشة لسرعة العرض، وقد قال له شو إنه يستخدم مكثفات لكبح جماح العرض عن الانطلاق بسرعة أكبر. كان الجاذب راسخاً، فعدم دقة الحاسوب لم تتسبب في اختفائه وتحوله إلى شيء عشوائي. كل ما في الأمر أنها كانت تجعله يلتوى أو يلف بصورة منطقية تماماً. واستأنف أبراهام الحديث: إن شو يعايش تجربة تنكشف أمامه فيها كل الأسرار، كل المفاهيم الأساسية: الأبعاد الكسرية ورقم ليابونوف Lyapunov exponent، كلها تأتي إليك بصورة طبيعية، تتأملها ثم تنطلق في الاستكشاف.

أهو علم يا ترى؟ إنه بالتأكيد لا ينتمي للرياضيات، فهذا الحاسوب لا يقوم بعمليات تنظير أو برهنة. ومهما كان التشجيع من أناس مثل أبراهام، فذلك لن يغير من الأمر شيئاً. ومن حيث كونه فرعاً من الفيزياء، لم يكن لدى قسم الفيزياء سبب وجيه لاعتباره في مجالهم أيضاً. على أنه مهما كان الأمر بالنسبة له، فقد جذب إليه النظارة. كان من عادة شو ترك باب غرفته مفتوحاً، وتصادف أن كانت تنفتح على الممشى إلى قسم الفيزياء. وسرعان ما وجد شو صحبة له.

اتخذت المجموعة التي أطلقت على نفسها "جماعة النظم الديناميكية *The dynamical system collective*"، أطلق عليها الزملاء "عُصبة الهيلولية" غرفة شو مستقراً لها. كان شو يواجه صعوبة في تسويق أفكاره أكاديمياً، ولكن أصحابه لم تكن لديهم لحسن الحظ هذه المشكلة. كانوا مقتنعين بوجهة نظره فيما يتعلق ببرنامج غير مخطط لاستكشاف هذا العلم المجهول.

أصبح دوين فارمر Doyne Farmer، شاب فارغ الطول من تكساس، المتحدث بلسان الجماعة. كان في عام ١٩٧٧ في الرابعة والعشرين، ممثلاً بالنشاط والحيوية، ومنبعاً للأفكار. وكان نورمان باكارد Norman Packard، أصغر منه بأربع سنوات، وصديق طفولة تربى معه في نفس المدينة، قد وصل إلى سانتا كروز في ذلك الخريف، وكان فارمر في بداية عام مكرّس لدراسة نظرية الألعاب، مطبقة على لعبة الروليت. كان يدرس ميل المنضدة، واتجاه الكرات، ويكتب المعادلات ويضع البرامج الحاسوبية، وقد كان لهذه الدراسة أثر في إعطائه قدرة على سرعة التحليل في موضوع النظم الديناميكية.

أما العضو الرابع في الجماعة فكان جيمس كرتشفيلد James Cruchfield، أصغرهم سناً، والوحيد من سكان كاليفورنيا، ماهر بدرجة غير عادية في الحاسوب. جاء إلى سانتا كروز كطالب مستجد، ثم عمل مساعداً لشو في برنامج التوصيل

الفائق، وقضى عاماً في مركز أبحاث أي بي إم، ولم ينضم كطالب دراسات عليا في سانتا كروز إلا عام ١٩٨٠، كان وقت تأسيس الجماعة يتردد على شؤ الحصول على ما يلزمه من معلومات رياضية عن النظم الديناميكية. وكأفرادها الآخرين، خرج عن الخط التقليدي في الدراسة.

لم يقتنع قسم الفيزياء بجديّة ترك شؤ لبحثه في التوصيل الفائق إلا في ربيع ١٩٧٨، إذ كان قاب قوسين أو أدنى من الدكتوراه. فمن وجهة نظر القسم، مهما كانت درجة ضجره، فالأحرى به أن ينتهي من شكيلات إنهاء الرسالة، ويحصل عليها، ثم ينطلق إلى حيث يشاء. أما عن دراسة الهولوية، فالأمر متعلق بالوضع الأكاديمي، فليس في سانتا كروز من هو مؤهل للإشراف على رسالة في ذلك العلم الذي لا اسم له ولا هوية، إذ لم يحصل أحد على درجة الدكتوراه فيه بعد. وبالتأكيد، ليس لطالب يرغب في ذلك التخصص المجهول أن يأمل في عمل يلتحق به في الحياة العملية. ثم إن هناك مشكلة التمويل. فتمويل الأبحاث العلمية كان يتم من خلال المؤسسة العلمية الوطنية National Science Foundation، مدعّمة من هيئات قومية مثل سلاح الطيران والبحرية ووكالة الطاقة وغيرها. كانت منحة الدراسة في بحث ما توكل للأستاذ الباحث، ينفق منها على كافة مصروفات البحث، من شراء للمعدّات أو المواد، وأيضاً في دفع رواتب المساعدين في البحث ممن يختارهم لذلك. فعلى طالب الدراسات العليا أن يجد أستاذاً يوظفه في بحث له، وإلا فليس له مورد للرزق. هذا هو النظام الذي كان أعضاء الجماعة الأربعة على وشك عزل أنفسهم عنه.

حين كانت قطعة من المهمات الإلكترونية تُفقد، فإنه أصبح من المؤلف البحث عنها في غرفة شؤ. وأحياناً كان أحد أعضاء الجماعة ينجح في تدبير مائة دولار من منظمة الخريجين، أو من قسم الفيزياء. وبالتدريج أخذت المهمات مثل راسمة إلكترونية أو محول للجهد تتكدس في غرفة شؤ. وكان في قسم الفيزياء حاسوب قد استغنى عنه وعلى وشك أن يلقي إلى مصيره الأخير في مخزن المهمات، فوجد طريقه إلى غرفته. وأصبح فارمر على مهارة خاصة في اختلاس أوقات من الحواسيب الأخرى لحساب الجماعة. فذات مرة دُعي إلى مؤسسة أبحاث الطقس في كولورادو، حيث أقوى الحواسيب، وذهل المتخصصون هناك لقدرته على استغلال أوقات ثمينة منها.

وكانت للمهارة في الإلكترونيات أثرها البالغ، فشؤ قد نشأ مولعاً بها، وباركر كان متخصصاً في إصلاح أجهزة التلفاز، وكترشفيلد كان على دراية خاصة

بمعالجات الحاسوب. وفي الوقت الذي كانت فيه حجرات قسم الفيزياء فى سانتا كروز لا تختلف عن مثيلاتها فى أية كلية أخرى، حوائط وأسقف تحتاج فى الغالب إلى إعادة الدهان، كان معمل شو يتخذ شكلاً متميزاً. أكوام من الأوراق مختلطة بالمهمات الإلكترونية المكسدة، وعلى الحوائط تغطى خرائط الجاذبات تدريجياً أماكن الصور المعتادة لحسناوات جزر هاواي. وحين كان أحد المتطفلين يتخذ طريقه لهذه الغرفة ليلاً أو نهاراً، يجد أعضاء المجموعة إما منكبين على تركيب دائرة إلكترونية أو عمل توصيلات كهربية، أو فى مناقشة حادة حول الإدراك أو حول التطور، أو ببساطة جالسين فى صمت مطبق أمام شاشة الحاسوب، أنظارهم معلقة بما يدور عليها من أشكال.



يقول شو: لقد جذبنا حقاً نفس الشيء، فكرة وجود نظم تحديدية، ولكن ليس تماماً. كان يخلب لبناً أن هذه النظم التحديدية التى درسناها يمكن أن تتمخض عن تصرفات عشوائية. وكنا نقترّب من فهم السر فى ذلك.

لا يمكن لأحد أن يقدر مدى ما فى هذا الاتجاه من تجديد، إلا إذا تصور سنوات ست أو سبع من غسيل المخ فى الدراسة الفيزيائية، تعلمنا فيها النظم الكلاسيكية التى تخضع تماماً للظروف الأولية، والنظم الكمية التى يقتصر ما نعرفه عن تصرفاتها على يتاح لنا من معلومات. أما اللاخطية، فشيء تلتقى به فى مؤخرة المراجع، كفصل نهائى يتم تجاوزه فى العادة، أو على أحسن الفروض يتعلم الطالب كيف يقربها إلى أقرب نظام خطى، حتى تكون الإجابة على القدر الممكن من التقريب. كان الأمر تدريباً على الإحباط.

لم يكن لدينا فكرة واضحة عن الأثر الحقيقى الذى تفعله اللاخطية بالنظم، كانت فكرة أن معادلة يمكن أن تتقافز فى تصرفات عشوائية تبدو مثيرة تماماً. إذا لم تكن العشوائية واضحة فى المعادلة، فمن أين أتت؟ كانت تبدو كشيء تحصل عليه مقابل لا شيء، أو شيء ينتج من لا شيء.

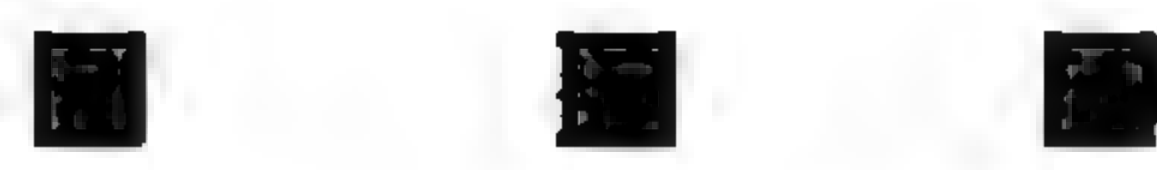
ويقول كرتشفيلد: "كان إدراكنا بأنه يوجد هنا عالم من الفيزياء لا يدخل فى نطاق أى نظام معروف. لماذا لم يكن هذا ضمن ما تعلمناه؟ كانت فرصة لنا أن نقتحم هذا العالم الساحر، وأن نتعلم منه شيئاً ما."

لقد متّعوا أنفسهم وأقنطوا أساتذتهم، بأسئلة مستحدثة عن التحديدية، وعن طبيعة الذكاء، وعن اتجاه التطور. يقول باكار: "إن الرباط الذي كان يشدنا لبعضنا البعض هو الرؤية المستقبلية. لقد ثبت في روعنا أنه لو أن أحدا منا أخذ نظاما كلاسيكيا قتل بحثا كموضوع للدراسة، فقد ينجز فيه خطوة ضئيلة من التقدم، لا يدخل في إطار هذا النظام الهائل من التحليل.

لقد كان بالإمكان أن تُكتشف الهيولية منذ زمن، ولكن ذلك لم يتحقق، جزئيا لأن الكم الهائل من العمل في مجال ديناميكا الحركة المنتظمة لا يؤدي لذلك الاتجاه. ولكنك فقط لو أمعنت النظر لوجدتها."

ويقول فارمر: "من نظرة فلسفية، فقد هزتنى كطريق فعال يمكنك من إيجاد توافق بين الإرادة الحرة والتحديدية. إن النظام تحديدي، ولكن ليس بإمكانك القول بما سوف يحدث الخطوة التالية. وفي نفس الوقت، كنت أشعر على الدوام بأن المشكلة الهامة هناك في العالم الواقعي لها علاقة بخلق التنظيمات، في الحياة أو في الذكاء. ولكن، كيف يمكنك دراسة ذلك؟ فما كان البيولوجيون يدرسونه كان تطبيقيا ومحدداً، أما الكيميائيون فلا يقومون به، والرياضيون لا يقتربون منه، وكان شيئاً لا يمت للفيزيائيين بصلة. لكنني كنت أشعر على الدوام بأن الظهور المفاجئ للتنظيم الذاتي أمر يدخل في نطاق الفيزياء.

إن تحت أيدينا عملة ذات وجهين؛ هنا نظام يتمخض عن فوضى، وعلى الجانب الآخر فوضى يكمن النظام في أعماقها."

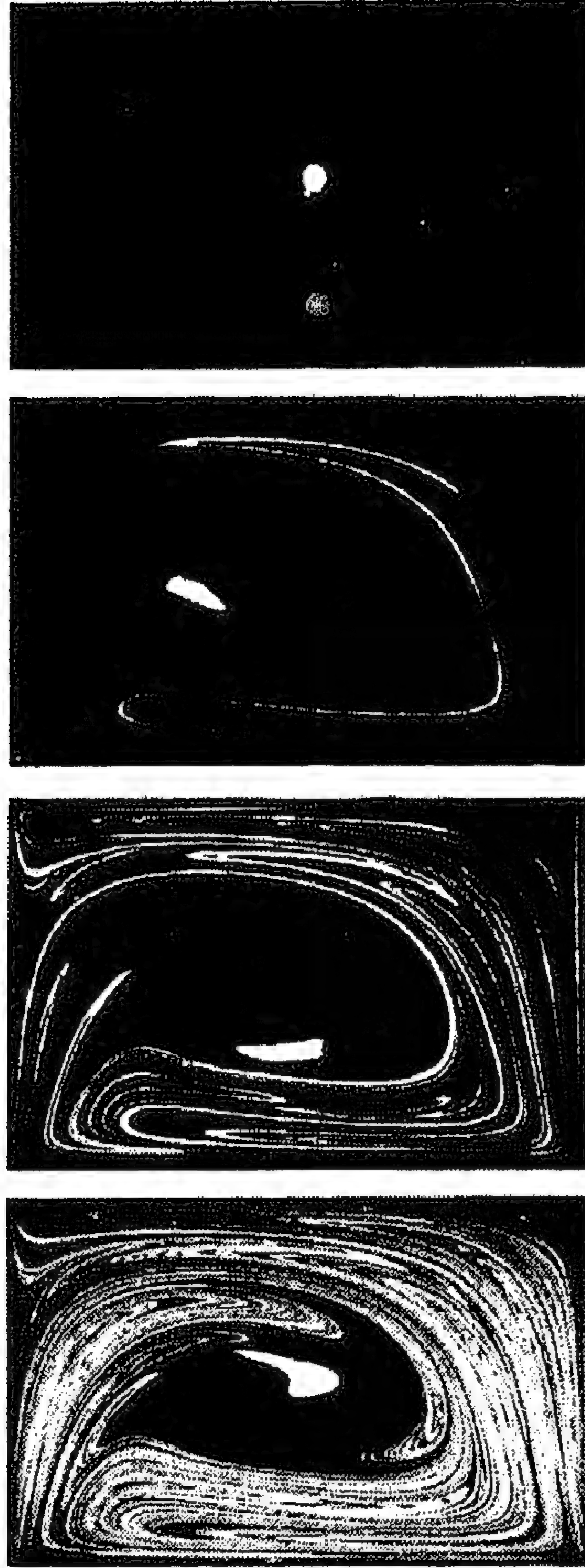


كان على شو ورفاقه أن يضعوا حماسهم الفياض في برنامج علمي محدد؛ أن يضعوا أسئلة قابلة للإجابة، وتستحق الإجابة. إنهم يبحثون عن طريقة تربط النظرية بالتطبيق، فهناك شعورهم بوجود فجوة لا بد من ملئها. وقبل أن يبدعوا خطوتهم الأولى، كان عليهم أن يعلموا ما هو معروف وما هو غير ذلك، وهذا في حد ذاته تحدٍ ليس بالهين.

كانت العقبة الكؤود أمامهم البطء الشديد في وسائل الاتصال في المناخ العلمي، وعلى الأخص حينما يتناثر علم جديد بين ثنايا مجالات العلوم المختلفة. ومن بين العوامل التي ساعدت كعلاج لهذه المعضلة كان ما قام به جوزيف فورد Joseph Ford، أحد أنصار الهيولية من معهد جورجيا التكنولوجي. كان فورد يرى أنه في دراسة

اللاخطية يكمن مستقبل الفيزياء بأسره، ونصب من نفسه منارا لكل من أراد أن يبحر في هذا الاتجاه، من خلال المقالات العلمية. كانت خلفيته في الهياكلية غير التشتتية non-dissipative chaos، في مجال الفلك وفيزياء الجسيمات الأولية. كان على دراية طيبة بمجهودات العلماء السوفيت في هذا المجال، كما جعل من أهدافه إقامة الصلة بين كافة من ينتهجون هذا النهج مستغلا علاقة بالكثيرين في كل مكان فما من أحد ينشر بحثا عن الهياكلية إلا ويضاف ملخصه إلى قائمة فوردد. علم أصدقائنا في سانتا كروز عن هذه القائمة، ومن خلالها كان فيض من الرسائل المتبادلة بينهم وبين أصحاب البحوث.

أدركوا أن هناك العديد من الأسئلة التي يمكن أن تُسأل حول الجاذبات الغريبة، ما هي أشكالها المميزة؟ ما هي هياكلها الطوبولوجية؟ ما الذي يمكن للهندسة أن تكشفه عن الفيزياء المتعلقة بالنظم الديناميكية؟ كان المنهج الأول هو الاستكشاف اليدوي الذي بدأ به شو. كان القدر الأكبر من المنهج الرياضي يتعامل مباشرة مع الهيكل، ولكنه بدأ لشو أكثر تفصيلا مما يجب. فكلما غاص في كتابات هذا المنهج، أحس بأن الرياضيين، وقد حُجِّبوا بتقاليدهم عن الوسائل الجديدة في الحسابات، قد دفنوا تحت الكثير من التعقيدات عن هياكل المسارات، لا نهايات هنا وانقطاعات هناك. فالرياضيون لا يعبئون بما هو غير قطعي التحديد، والذي هو من وجهة نظر الفيزيائيين يمثل ما يحكم به الواقع العملي. فشوا لم ير على شاشة الحاسوب مسارات منفصلة، بل أغلفة تضم بداخلها العديد من المسارات. هذه الأغلفة هي ما يتغير بينما هو يدير مقبض التحكم برقة. لم يكن مستطيعا أن يعطى تفسيراً متقنا لما يحدث من التواءات وانطواءات بلغة الطوبولوجيا الرياضية، ولكنه بدأ يشعر أنه يفهمها حق الفهم.

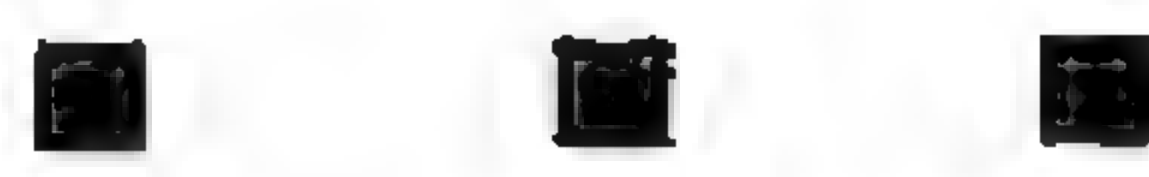


شكل ٩-١ الخلط الهيولي: بعض القطرات تمتزج سريعاً، البعض الآخر، قطيرة بالقرب من المركز، لا تكاد تمتزج على الإطلاق. بينت تجارب عديدة على سوائل حقيقية أن عملية المزج، والذي يبدي عنادا معروفاً في الطبيعة والصناعة على السواء، لا تزال غير مفهومة تماماً؛ وقد تكشف مدى التصاقها برياضيات الهيولية. كشفت الأنماط عن عمليات للمطّ والشدّ تعود بنا إلى حدوة سمول.

يميل الفيزيائي إلى إجراء القياسات. فما الذي في هذه الصور المتحركة المراوغة يمكنه قياسه؟ حاول هو والآخرون أن يعزلوا الخصائص التي تجعل للجاذبات الغريبة هذا السحر. الحساسية المرهفة للظروف الأولية، وميل المسارات القريبة إلى التباعد عن بعضها البعض. هذه الخصيصة التي جعلت لورنز يؤمن بأن التنبؤ بعيد المدى للطقس أمر محال. ولكن أين هي المعايير لقياس هذه الخصيصة؟ هل يمكن قياس عدم القابلية للتنبؤ؟

كانت الإجابة عن هذا التساؤل كامنة في مفهوم روسي هو "رقم ليابونوف Lyapunov exponent" يعطى وسيلة لبيان الخصائص الطوبولوجية المتعلقة بمفهوم مثل عدم القابلية للتنبؤ. فهذه الأرقام تعطي في أي نظام طريقة لقياس التأثيرات المتعارضة للمطّ والانكماش والطي في فضاء الطور للجاذب. إنها تعطي صورة لكافة الخصائص المؤدية إلى الاستقرار أو عدم الاستقرار. فالرقم أكبر من الصفر يعني المط، حيث تتباعد النقاط القريبة، الأقل من الصفر يعني الانكماش. ولجاذب ذي نقطة محددة، يكون للجاذب رقم سالب، حيث يكون التجاذب إلى الداخل، تجاه نقطة الاستقرار. والجاذب الذي ينتهي إلى حركة متذبذبة يكون ذا رقم يساوي الصفر بالضبط، ورقم آخر سالب. أما الجاذب الغريب، فقد اكتشف أن له رقماً موجباً واحداً على الأقل.

لم يكن طلبة سانتا كروز هم من اكتشفوا هذا، لكنهم طوروه إلى أقصى قدر ممكن من الوجهة العملية، وقد علموا كيف يقيسون أرقام ليابونوف وأن يربطوا بينها وبين الخصائص الأخرى الهامة. استخدموا الحاسوب لإنتاج صور متحركة تبين النظم الديناميكية في انتظامها وفي هيولييتها. وبينت تحليلاتهم كيف يمكن لبعض النظم أن تنزع للهيولية في اتجاه ما، بينما تظل في اتجاه آخر في محيط الانضباط. بينت إحدى الصور المتحركة ما يحدث لمجموعة من النقاط المتجاورة-تمثل الظروف الأولية- على جاذب غريب حين يتطور مع الزمن، فالنقاط بدأت تتباعد وتفقد تركيزها، ثم تتحول إلى نقطة، فقاعة. في بعض الجاذبات، تنتشت الفقاعة سريعاً، وهي جاذبات لها كفاعتها في عمليات الخلط. وبعض الجاذبات الأخرى، يكون التشتت في اتجاه معين، فيبدو ذلك وكأن للنظام نزعة للانتظام وعدم الانتظام معاً، والنزعتان منعزلتان. فبينما تؤدي نزعة إلى عدم القابلية للتنبؤ، تؤدي الثانية إلى دقة كالساعة، وكلا النزعتين يمكن تحديدهما وقياسهما.



أهم ما يُميّز بصمة باحثي سانتا كروز على علم الهيولية أنها ربطت بينها وبين ما يسمى بنظرية المعلومات information theory، وهي مزيج من الرياضيات والفلسفة،

وضعها عام ١٩٤٠ كلود شانون Claude Shannon في معامل شركة بل. وقد أطلق شانون على بحثه "نظرية رياضية للاتصالات"، ولكنها كانت تتعلق بكمية معينة، تسمى "المعلومات"، ومن ثم فقد شاعت تسمية نظرية المعلومات. هذه النظرية هي إحدى نتاج عصر الإلكترونيات. فقنوات وخطوط الاتصالات تحمل شيئاً ما، سرعان ما أخذت الحواسيب تختزنه على دوائر إلكترونية أو أقراص ممغنطة. هذا الشيء في حد ذاته لا هو بذى معنى أو يحمل معرفة، فوحداته ليست أفكاراً أو معاني، أو حتى حروفاً وأرقاماً، وهو يمكن أن يكون ذا معنى أو بلا معنى، ولكن المهندسين والرياضيين كانوا قادرين على قياسه، ونقله، واختبار دقة النقل. لقد كانت كلمة "المعلومات" ذات نفع على الدوام، ولكنهم كانوا يستخدمونها دون الترابط المعتاد بالحقائق أو بالحكمة أو بالفهم.

وقد أثر تصميم الأجهزة في بناء النظرية، فلأن المعلومات كان تسجل على هيئة ثنائية binary بواسطة مفاتيح كهربية، إما موصلة أو مفصولة، فإن وحدة المعلومة أصبحت هي "البتة". bit"الطومن الناحية التقنية الصرفة، كانت نظرية المعلومات تهتم بمقدار درجة التشويش الذى يتداخل عشوائياً مع البتات المرسله. وقد أدت إلى أن يمكن حساب الطاقة المطلوبة لنقل أو تخزين المعلومات على تلك الصورة، فى قنوات الاتصالات أو على الأقراص الممغنطة أو المدمجة، سواء أكانت لغة مكتوبة أو صورة أو صوتاً، أو أية هيئة تكود عليها المعلومات. وأعطت النظرية إمكانية معرفة مدى كفاءة نظام ما لتصحيح الأخطاء، عن طريق إجراء اختبارات معينة.

ومن المفاهيم الهامة فى هذه النظرية مفهوم "التزيد redundancy". تحتوى على قدر كبير من الوحدات الزائدة عن المطلوب لنقل المعلومة، وهو ما يمكننا من حل الكلمات المتقاطعة أو فهم عبارة ضاعت بعض معالمها. هذا التزيد فى اللغة والمرتبط بالمعنى من الصعب قياسه، لتداخل عوامل كثيرة فيه، ولكنه فى بعض الصور يقبل ذلك. فوجود حرف أفى اللغة الإنجليزية يجعل الأكثر احتمالاً أن يتلوه حرف h، ثم حرف o، وهكذا. وكلما زادت عدد الحروف كان الاحتمال للحرف التالى أكبر. هذه الاحتمالات قابلة للقياس، وبها تكون وسائل فك الشفرات. كما يستخدمها المهندسون اليوم فى تكديس البيانات وضغطها فى قنوات الإرسال أو التخزين على الأقراص. بالنسبة لشانون، فإن الطريقة الصحيحة للنظر لهذه النماذج هى على الوجه التالى: إن تدفق البيانات بالنسبة للغة المعتادة ليس عشوائياً صرفاً، فكل بتة bit جديدة تكون مقيدة بقدر ما بما سبقها من بتات، وعلى ذلك فكل بتة جديدة تحمل قدراً من المعلومات يقل بقدر ما عن قيمة بتة سابقة. ويوجد فى هذا العرض شيء ما من التضارب، كلما مال تدفق البيانات للعشوائية، زادت القيمة المعلوماتية information value للبتة الجديدة^أ.

وبالإضافة إلى ملاءمة هذه النظرية للمتطلبات الهندسية، اتخذت نظرية المعلومات ثوباً فلسفياً متواضعاً، ويمكن أن يغزى قدر مدهش من انجذاب أفراد من خارج مجال شانون لنظريته في معنى يتلخص في كلمة واحدة: الإنتروبيا *entropy*. ويعبر وارن ويفر Warren Weaver عن ذلك بقوله: "حينما يقابل المرء مفهوم الإنتروبيا في نظرية الاتصالات، فإن له الحق أن يشعر بالإثارة؛ الحق في أن يتوقع شيئاً أساسياً وجوهرياً .

وقد ظهر مفهوم الإنتروبيا من علم الديناميكا الحرارية، حيث ارتبط بالقانون الثاني لها، والذي ينتهي إلى نزعة كافة النظم المغلقة، بما فيها الكون نفسه، إلى الانزلاق تدريجياً تجاه المزيد من الفوضى. تخيل أنك قسمت صندوقاً إلى قسمين بحائل، ثم ملأت نصفاً منه بالماء، والآخر بالحبر. فلو أنك نزعْتَ الحائل، فإن الحبر والماء سوف يختلطان عن طريق الحركة العشوائية لكليهما، ولكن من المستحيل أن يعود النظام من تلقاء نفسه إلى حالة الانضباط الأولى، الحبر في جانب والماء في جانب آخر، حتى لو انتظرنا إلى نهاية الدهر. ومن هذا المنطلق ينظر للقانون الثاني للديناميكا الحرارية على أنه يجعل للزمن اتجاهها وحيداً. والإنتروبيا هي خاصية يبين القانون الثاني أنها تتزايد مع الزمن، في صورة خلط أو فوضى أو عشوائية. هذا المعنى من السهل في الحياة اليومية فهمه بالسليقة، عن أن يقاس كمياً، إذ ما هو المعيار الذي يعتمد عليه لتقدير درجة خلط مادتين؟ قد يتصور المرء قياس الجزيئات في عينة معينة، ولكن ماذا إذا كان النظام مكوناً من نبضات متتالية، نعم، لا، نعم، لا، لا، نعم، نعم؟ وهكذا؟ نظام موضوع بحيث يتحدى أي خوارزم للعد. وفي نظرية المعلومات، تضع موضوعات المعاني والتمثيل المزيد من التعقيدات. فتسلسل من البتات مثل ٠٠ ٠١٠٠ ٠١٠ ١١ ٠٠ ١٠ ٠٠ ٠٠٠^{iv} قد يبدو مألوفاً فقط لمن له دراية بكود مورس. فماذا عن التماذج الطبولوجية للجاذبات الغريبة؟

بالنسبة لشو، كانت الجاذبات الغريبة آلات توليد للمعلومات. ففي تصوره الأول والأعظم، تقدم الهيولية وسيلة طبيعية لإعادة الأفكار التي استخلصتها نظرية المعلومات من الديناميكا الحرارية-بعد تجديد نشاطها-إلى علم الفيزياء. فالجاذبات الغريبة، بدمجها النظام واللانظام، قد أدخلت قياس الإنتروبيا في منعطف جديد مليء بالتحدي، فهي مازجات غاية في الكفاءة، تخلق عدم القابلية للتنبؤ، وترفع الإنتروبيا. لقد رآها شو، إنها تخلق المعلومات حيث ليس منها شيء متاح.

كان نورمان باكار يقرأ فى مجلة *Scientific American* حين رأى إعلاناً عن مسابقة للأبحاث العلمية، تسمى مسابقة لويس جاكو Louis Jacot. مسابقة ذات جائزة قيمة مهداة من رجل أعمال فرنسى كانت له نظرية خاصة عن الفلك، والمجرات داخل المجرات، وهو يدعو إلى أية مقالات تخدم مجاله. كان اليوم الأخير للمسابقة هو رأس السنة لعام ١٩٧٨.

كانت الجماعة قد انتظمت فى لقاءات دورية فى أحد المنازل فى سانتا كروز، مكدس بالأثاث الذى تم شراؤه من سوق الأشياء المستعملة، وأجهزة الحاسوب المخصصة لدراسة نظرية المقامرة. وكان شو يحتفظ بألة بيانو فيه، يتمتع زملاءه بخليط من الموسيقى الكلاسيكية والحديثة. وقد وضعوا نظاما للعمل مبنيا على طرح الأفكار بحرية، ثم تنقيحها طبقا لدرجة واقعيته، وبالتدريج تعلموا كيف يتعاونون مع المجالات العلمية، وكانت أول مقالة لهم من وضع شو.

فى ديسمبر من عام ١٩٧٧ سافر شو لحضور مؤتمر فى أكاديمية نيويورك مخصص للهولوية، ولسماع الكلمات من أشخاص لم يكن يسمع عنهم إلا من خلال أعمالهم؛ دافيد رول وروبرت ماى وجيمس يورك. وامتألت نفسه بالرهبة إزاء هؤلاء الأشخاص. كان خلال سماعه للكلمات تتجاذبه أحاسيس بأنه قد انكب على أفكار قد قُتلت بحثاً، ولكن من جهة أخرى بأنه أصبح على دراية بنقطة جديدة للاستمرار. كان قد أحضر معه مسودة لبحثه غير المكتمل عن نظرية المعلومات، فشل فى كتابته على الآلة الكاتبة لضيق الوقت.

كانت أهم فعاليات المؤتمر هى حفلة العشاء التى أقيمت على شرف إدوارد لورنز، والذى أتيح له أخيراً أن يحظى بالاعتراف الذى راوغه لسنوات. وحين دخل لورنز الصالة، متأبطاً ذراع زوجته فى خجل، هب الجميع على أقدامهم لتحيته، ودهش شو لنظرة الفرع التى بدت فى عينى عالم الطبيعة الجوية الجليل الشأن.

وفى طريقه للعودة، أرسل بحثه إلى مسابقة جاكو، خليط من الرياضيات الغريبة والفلسفة المثيرة للجدل، والأشكال الكارتونية التى رسمها أخوه كريس. فاز البحث بالجائزة، والتى أتت فى وقت حرج فى علاقة المجموعة بالإدارة، فقد هجر فارمر الفيزياء الفلكية، وباكار الرياضيات الإحصائية، أما كرتشفيلد فلم يكن مستعداً بعد لأن يعد من الخريجين، وقد أحست الإدارة بأن الأمور تخرج من بين يديها.



انتشر مقال "الجاذبات الغريبة، التصرف الهولي وتدفق المعلومات Strange Attractors, Chaotic Behavior and Information Flow" إعادة كتابته في ذلك العام حتى وصل ألف نسخة، وهو أول عمل جادٍ يربط بين نظرية المعلومات والهولية.

استخرج شو بعض فروض الميكانيكا الكلاسيكية القابعة في الظل، إن الطاقة في النظم الطبيعية تكون على صورتين، ففي العالم الملموس، يمكن قياسها وحسابها بطرق عديدة، أما في العالم اللاملموس، عالم الذرات التي تهيم في عشوائية، فلا تقاس إلا كمتوسط لكينونة خاصة، هي الحرارة. وقد لاحظ شو أن الطاقة على المستوى اللاملموس تفوق بمرات نظيرتها على المستوى الملموس، ولكنها ليس لها اعتبار عند هذا المستوى، فدرجة الحرارة في نطاق المستوى الملموس ليس لها اعتبار، إلا إذا كان مطلوباً معرفة درجة حرارة الجسم لمعرفة أسلوب حركته. إن المستويين لا اتصال بينهما، وكانت وجهة نظر شو أن النظم الهولية والقريبة من الهولية هي التي تقفل الفجوة بينهما، فالهولية هي خالقة المعلومات.

يمكن تصوّر تيار مائي يواجه عائقاً، فعند سرعة كافية نجده يكون دوامات بعد عبوره العائق. فإذا كانت السرعة عند حد معين، نجد الدوامات ثابتة في مكانها، وبعد سرعة معينة، نجدها تتحرك. ويمكن للباحث أن يجد طرقاً عديدة لاستخلاص البيانات من نظام كهذا، باستخدام مسابر لقياس السرعة وأشياء مشابهة. ولكن، ماذا لو أننا جربنا طريقة مبسطة؛ لنختار نقطة بعد العائق مباشرة، ونقيس سرعتها عند فترات محددة، ونرى إذا كانت الدوامة إلى اليمين أو إلى اليسار.

لو أن الدوامة ثابتة، فإن تدفق البيانات سوف يكون على الوجه التالي: يسار، يسار، يسار.. وهكذا إلى أن يشعر المراقب أن التدفق لا يعطي أية معلومات جديدة عن النظام.

ومن الممكن أن يكون تدفق البيانات على النحو التالي: يمين، يسار، يمين، يسار، يمين، يسار، وهكذا. ورغم أن هذا التدفق أكثر إثارة بقدر ما عن الأول، إلا أنه أيضاً سرعان ما يفقد هذه الإثارة.

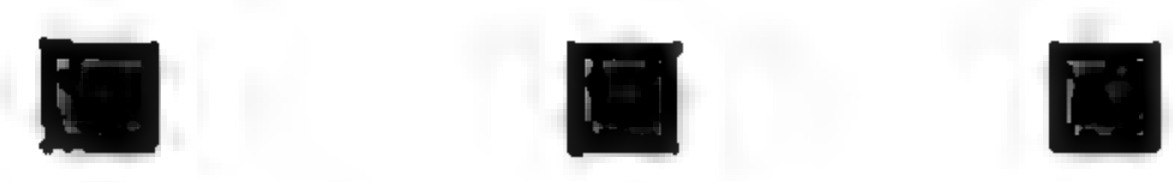
أما حين يتحول النظام إلى الهولية، فإنه سوف يصبح فيّاضاً بالمعلومات في كل لحظة. فكل قياس جديد (كل بته من المعلومات) يحمل مفاجئته معه.

ما هو مصدر هذه المعلومات؟ فيض الحرارة في المستوى اللاملموس، بلايين الجزيئات في رقصاتها الديناميكية الحرارية. وبالضبط كما ينقل الاضطراب الطاقة من

العالم الملموس خلال سلاسل من الدوامات لتنتشت خلال الزوجة على مستويات أصغر فأصغر، فالمعلومات تنتقل في مسار عكسي من المستويات الأدنى إلى الأعلى-على أية حال، فهكذا نظر شو ورفاقه للمسألة. والقناة التي ينتقل عبرها المعلومات صعوداً لأعلى هي الجاذبات الغريبة، تكبر العشوائية الابتدائية بالضبط كما يكبر تأثير الفراشة حالات عدم التأكد الضئيلة إلى نماذج للطقس على مقياس أكبر.

وكان السؤال، إلى أى مدى؟ مرة أخرى، وجد شو أن السوفيت كانوا فى المقدمة. فقد وضع كل من أن. كولموجوروف A.N. Kolmogorov وياشا سيناي Yasha Sinai بارعة عن طريقة تطبيق "معدل الإنتروبيا بالنسبة للزمن" على الصور الهندسية للأسطح التي تطوى وتمط لفضاء الطور. والفكرة الجوهرية هي وضع مربع صغير حول مجموعة من الظروف الأولية، كما لو قمنا بوضع مربع صغير على سطح بالون، ثم يحسب تأثير ما يجرى على المربع من التواءات وتمدد. فهو قد يتمدد في اتجاه واحد، بينما يظل ضيقاً في اتجاه آخر، ويقابل التغير في المساحة دخول عنصر اللاتأكد في ماضى النظام، أى اكتساب أو فقد للمعلومات.

وبالقدر الذى تعتبر فيه المعلومات مجرد كلمة براءة لعدم التأكد، فإن هذا المفهوم لا يزيد عن أن يتفق مع الأفكار التي كان علماء مثل رول يقومون بوضعها. ولكن إطار نظرية المعلومات مكن مجموعة سائتا كروز من اتباع منهج منطقي رياضى تم فحصه تماماً عن طريق منظرى الاتصالات. فإضافة شيء من التشويش على نظام تحديدي أصلاً مسألة غريبة على الديناميكا ولكنها مألوفة تماماً لعلماء الاتصالات. وكان ما يشد هؤلاء العلماء الشبان حقيقة هي الرياضيات بصورة جزئية. فهم حين خاضوا في النظم المنتجة للمعلومات، كانوا يفكرون في التوليد التلقائي للنماذج في العالم. يقول باركار: "في قمة العمليات الديناميكية المعقدة يوجد التطور البيولوجي وعمليات التفكير، ويبدو بداهة إحساس واضح بأن هذه النظم التي هي غاية في التعقيد منتجة للمعلومات. فمنذ ملايين من السنين مضت، لم يكن على وجه الأرض سوى تجمعات من كائنات وحيدة الخلية، والآن، بعد كل هذه الدهور، ها نحن هنا، ومن ثم فإن المعلومات قد خلقت وخرنت في أبنيتنا. وفي تطور عقل المرء منذ الطفولة، فإن المعلومات لا تختزن فقط، بل أيضاً تنتج، تنتج من ارتباطات لم تكن موجودة من قبل." كان نوعاً من الحديث يبث الدوار في رأس أعنى الحكماء من الفلاسفة.



لقد كانوا علماء أولاً، ثم فلاسفة ثانياً. هل بإمكانهم أن يصلوا الفجوة بين الجاذبات الغريبة التي يفهمونها جيداً وبين تجارب الفيزياء الكلاسيكية؟ إن القول بأن تدفقاً من يمين، يسار، يمين، يسار، يسار، يمين، يسار... هو غير قابل للتوقع ومنتج للمعلومات شيء، وقياس رقم ليابونوف وإنتروبيا وأبعاد تدفق حقيقى شيء آخر. ورغم ذلك فإن فيزيائي سانتا كروز قد أمتعوا أنفسهم بهذه الأفكار أكثر من غيرهم من أقرانهم القدامى. فبمعاشتهم الجاذبات الغريبة ليل نهار، أصبحوا يتعرفون عليها فى ظواهر الرفرفة، والاهتزاز، والتأرجح، والنبض التى تحدث فى الحياة اليومية.

كان من عاداتهم القيام بلعبة معينة، أن يجلسوا فى أحد المقاهي، ثم يسألوا بعضهم البعض: "ما أقرب جاذب غريب عنا؟ أهو حاجز التصادم المهتز لهذه السيارة، أم ذلك العلم المرفرف، أم هذه الأوراق التى يداعبها النسيم؟" وقد كان شو، وهو يعد عدته لبرنامج بحثى يستغرق سنوات، قد ابتدع أبسط نظام ديناميكى يمكن لفيزيائى أن يتصوره، مجرد صنبور يتساقط منه الماء. وقد يظن أغلب الناس أنه نظام دورى، ولكن واقع التجربة يبين غير ذلك. "إنه نموذج لنظام يمكن أن يتحول من القابلية للتوقع إلى عدم القابلية لها، فزيادة الفتحة قليلاً، تسمع طرقات الماء وقد اختل انتظامها. لقد اتضح أنه نظام لا توقى بعد برهة صغيرة من الزمن، ومن ثم فإن نظاماً من البساطة كهذا يمكن أن ينتج نمودجا خلّاقاً."

ولا يصلح صنبور المياه فى إنتاج العديد من النظم، فهو لا يقدم إلا قطرات متشابهة، ولكن بالنسبة لباحث مبتدئ فى مجال الهولوية، فقد أثبت الصنبور أنه يتمتع بعدة مزايا. سهل التصور ذهنياً، وتدفق البيانات فيه وحيد البعد كأفضل ما يكون، نقرات رتيبة لنقاط منفردة سهلة القياس مع الزمن. لم يحز أى من النظم التى درست لاحقاً فى سانتا كروز مثل نظام الوقاية البشرى أو التصادمات فى معجلات الجسيمات فائقة الطاقة على مثل هذه المزايا. وقد حصل مجربون آخرون مثل لبشابر Libchaber وسوينى على بيانات وحيدة البعد عن طريق وضع مسابر فى مواضع اعتباطية عند نقطة فى نظم أكثر تعقيداً، أما فى الصنبور المائى فكل ما فى الأمر هو البيانات التى تسير فى خط واحد، وهى لا تحتوى حتى على سرعات أو درجات حرارة متغيرة، مجرد قائمة لنقاط متساقطة مع الزمن.

وتجهيزاً لحملة استكشافية لنظام كهذا، يقوم الفيزيائى الكلاسيكى بوضع نموذج واف بقدر استطاعته. والعمليات التى تحدد إنتاج والتحكم فى القطرات مفهومة، وإن لم تكن بالبساطة التى تبدو عليها. فأحد المتغيرات الهامة هو معدل التدفق، والذى كان

من الواجب أن يكون بطيئاً بالنسبة للنظم الديناميكية الأخرى، فقد استخدم شو معدلاً يصل من نقطة إلى نقطة إلى عشر نقاط في الثانية، أى ٢٠ إلى ٣٠٠ جالون كل أسبوعين. ومن المتغيرات الأخرى اللزوجة والتوتر السطحي. إن قطرة معلقة تنتظر وقت انفصالها، تمثل شكلاً معقداً ثلاثي الأبعاد، تتطلب حساباته وحدها تحليلاً حاسوبياً معقداً، كما بين شو. وبالإضافة لذلك، فالشكل ليس ثابتاً، فهو أشبه بحقيبة مرنة قوامها التوتر السطحي، تمتلئ وتستطيل بالتدريج إلى أن تعبر نقطة حرجة تنفصل بعدها. وإذا ما أراد فيزيائي أن يضع نموذجاً وافياً لهذه القطرة، بكتابة كافة العوامل الداخلة في تشكيلها على صورة معادلات يمكن حلها لكافة المواقف، سوف يجد نفسه في متاهة يصعب الخروج منها.

والبدل الآخر هو نسيان الفيزياء كلية، والنظر فقط للبيانات، كما لو كانت آتية من صندوق مصمت. لو أن متخصصاً في النظم الديناميكية الهيولية قد أوتى قائمة بالقطرات عند فترات منتظمة من الزمن، هل سيجد بها شيئاً هاماً يمكنه أن يقوله؟ لقد اتضح في الواقع أنه يمكن وضع تنظيمات معينة للبيانات يمكن العودة بواسطتها إلى الفيزياء، وأن هذه الطرق أصبحت في غاية الأهمية بالنسبة لصلاحية تطبيق الهيولية في العالم الواقعي.

ولكن شو مضى في طريق وسط بين هذين الاتجاهين المتطرفين. فهو قد وضع نموذجاً تقريبياً للقطرة، تجاهل فيه الشكل، والحركة المعقدة ثلاثية الأبعاد، متصوراً ثقلاً معلقاً من زنبرك، وأن الثقل يزداد وزنه بانتظام مع الزمن. سوف يزداد مط الزنبرك تدريجياً، ويهبط الثقل أكثر وأكثر، إلى أن يسقط جزء منه عند لحظة ما. وافترض شو اعتباطياً أن الكتلة التي سوف تنفصل تعتمد بصورة مباشرة على السرعة لحظة الانفصال.

والذي يحدث بداهة بعد ذلك أن الثقل يرتد لأعلى، ويتذبذب الزنبرك في حركة يمكن لأي طالب لم يتخرج بعد أن يضع المعادلات لنمذجتها. ولكن الخاصية المثيرة في النموذج، والصورة الوحيدة من الملاحظة والتي تجعل الحركة الهيولية محتملة، هو أن القطرة التالية تعتمد على كيفية تفاعل الزنبرك مع الثقل المتزايد في الوزن. فالارتداد لأسفل يمكن أن يزداد من سرعة الانفصال، بينما يمكن أن يبطئ الارتداد لأعلى منه. وفي حالة صنبور حقيقي، فإن القطرات ليست جميعها متساوية في الوزن، فالوزن يعتمد على كل من اللزوجة واتجاه الارتداد. فإذا بدأت قطرة حياتها وهي هابطة، فإن ذلك يعجل من سرعة انفصالها، أما إذا بدأت وهي مترنّة، فسوف يكون بإمكانها أن تنتظر شيئاً ما فتزداد امتلاء. وقد كان نموذج شو من البساطة بحيث يمكن نمذجته في ثلاثة معادلات

تفاضلية، الحد الأدنى للنظم الهيولية كما بين بوانكاريه ولورنز. ولكن هل يمكنه أن يولد تعقيدا يماثل ما ينتجه صنوبر حقيقي؟ وهل سيكون نفس نوع التعقيد؟

وهكذا وجد شو نفسه قابعا في معمل في مبنى الفيزياء، فوق رأسه صندوق كبير من البلاستيك ممتلئ بالماء، يتصل الماء فيه بصنوبر نحاسي على أرقى ما أنتج من صنابير. وتقطع كل قطرة ساقطة شعاعاً ضوئياً بحيث تُسجّل في حاسوب في غرفة مجاورة. في نفس الوقت يوجد حاسوب آخر مغذى بالمعادلات الثلاث، يجمع البيانات لنظام تخيلي. وذات يوم قدم شو عرضاً مثيراً، القطرات المتساقطة تصدر صوتاً على قطعة من القصدير، والحاسوب يواكب الصوت قطرة بقطرة على شاشته. لقد حلّ المسألة من الأمام ومن الخلف في آن واحد، وأمكن لمشاهديه أن يسمعوا البنية الداخلية لهذا النظام العشوائي ظاهرياً. ولكن للتقدم عن ذلك، تحتاج المجموعة إلى طريقة تأخذ بها البيانات الخام من تجربة ما، وتسير منها إلى وضع المعادلات والجاذبات الغريبة الخاصة بالتصرف الهيولي.

في نظم أكثر تعقيدا، قد يتخيل المرء رسماً متغيراً في مقابل الآخر، يربط التغير في الحرارة أو في السرعة مقابل الزمن. ولكن صنوبر شو لم يكن يعطي إلا سلسلة من بيانات متعلقة بالزمن، ولذا فقد جرب شو تكتيكاً أصبح فيما بعد أهم مساهمات مجموعة سانتا كروز في دراسات الهيولية، يمكن به رسم فضاء الطور لجاذب غريب ليس متاحاً رؤيته، قابل للتطبيق على أية بيانات مهما كانت. فبالنسبة للصنوبر، رسم شو شكلاً بيانياً ثنائى الأبعاد، على محوره الأفقى الفترة بين القطرة الأولى والثانية، وعلى المحور الرأسى الفترة بين الثانية والثالثة. فإذا مرت ١٥٠ ملى ثانية في الفترة الأولى، ومثلها في الفترة الثانية، كان توقيع النقطة هو ١٥٠-١٥٠.

كان هذا كل ما في الأمر. فإذا كان التيار منتظماً في تدفقه، فإن الشكل لن يزيد عن نقطة. وكان الفرق في الواقع بين النظام الواقعي والممثل حاسوبياً هو تعرض الأول للتشويش، وهو ما دعا شو إلى أن يجعل أغلب عمله مساءً، حين تخف الضوضاء إلى أقصى حد، والتي يكون تأثيرها أن تتحول النقطة الموقعة على الشكل البياني إلى بقعة غير محددة الملامح.

وبزيادة سرعة التدفق، يبدأ النظام في الدخول في مرحلة التفرع الثنائي، حيث يمكن أن تكون فترة ١٥٠ ملى ثانية والتالية ٨٠ على ذلك يظهر الشكل البيانية بقعتين بدلا من واحدة، واحدة عند النقطة ٨٠-١٥٠ والأخرى عند ٨٠-١٥٠، وكان الاختبار

الحقيقى حين يتحول النظام إلى الهيولية. فلو أنه كان عشوائيا صرفا، ملأت النقاط سطح الورقة، بحيث يستحيل إدراك أية علاقات نحو توزيعها. ولكن لو أن جاذبا غريبا كان متضمنا فيه، فإنه سوف يظهر نفسه بتحويل البقع غير المحددة الملامح إلى هياكل واضحة.

فى الغالب كان إظهار الهيكل يحتاج إلى ثلاثة أبعاد، ولكن لم تكن هذه مشكلة. فهذا الأسلوب يمكن تطويره بسهولة لأبعاد أعلى. ويعكس هذا الأسلوب ثقة هؤلاء الباحثين العمياء فى وجود نظام كامن فى أعماق النظم التى تبدو عشوائية، وأنه يظهر نفسه حتى فى حالة عدم معرفة العوامل الفيزيائية الفعالة، أو عدم إمكان قياسها. وبدأت مجموعة سانتا كروز تتعاون مع باحثين آخرين مثل سينواي، وتعلموا كيف يظهر الجاذب الغريب لشتى النظم. كانت المسألة تتلخص فى توقيع قضاء الطور بالأبعاد المناسبة. وسرعان ما وضع فلوريس تاكنز Floris Takens الذى اكتشف الجاذبات الغريبة مع دافيد رول، الأساس الرياضى لهذا الأسلوب القوي، والذى يستخلص الجاذبات الغريبة من تدفق البيانات الواقعية. وقد اتضح لعدد لا يحصى من الباحثين بعد ذلك، أن هذا الأسلوب يميز بين الهيولية وبين التشويش. فالأخير يبعثر البيانات بلا ضابط، بينما تقوم الهيولية بجذبها إلى شكل متميز.



كان التحول من متمردين إلى فيزيائيين يمضى ببطء، فكثيرا ما كانوا يتساءل أحدهم خلال جلساتهم فى المعمل أو فى المقهى: "رباه، إننا لا نزال على هذا الطريق، فإلى متى؟"

كان مناصروهم الأساسيون هم رالف إبراهيم من قسم الرياضيات، ومن قسم الفيزياء فقد كان فى حالة حرجة. فبعد عدة سنوات، انبرى فريق من الأساتذة لنفى أن المجموعة قد عانت من الإنكار والمعارضة من القسم، بينما ظل أفراد المجموعة يحتفظون بالذكريات الأليمة لهذه حيث الحرمان من الإمكانيات ومن الموجهين.

على أن الفترة لم تخل من معاونة وتشجيع، فقد استمر أستاذ شو المشرف على بحث التوصيل الفائق فى دعمه مادياً بعد انسحابه من البحث لمدة عام تقريبا. ولم يقم أحد بإعطاء أمر صريح بوقف أبحاث الهيولية. فأسوأ ما وصلت إليه الأمور كان التجاهل، ومحاولة إثناء أفراد المجموعة فرداً بعد الآخر عن الاستمرار فى هذه الأبحاث، بإسداء النصح بأنه طريق غير مأمون علمياً، حيث لا توجد درجة للدكتوراه فيه.

إن هذه الأبحاث، قد يقول الناصح، مجرد نزوة سرعان ما ستخبو، فأين تذهب بعدها؟
على أن أبحاث الهيولية كانت تدعم خطواتها، وكان على أفراد المجموعة اللحاق بها.

بعد عام، جاء فايجنباوم ليعطي سلسلة من المحاضرات حول الفتح العلمي المتمثل في العمومية. وكالعادة، كانت محاضراته رياضية صمماً، تدور حول نظرية إعادة الاستنظام التي لم يدرسها أفراد المجموعة. كما أن المجموعة كانت بالنظم الواقعية أكثر من خرائط وحيدة البعد، وفي هذه الأثناء سمع فارمر عن رياضي، هو أوسكار لانفورد الثالث Oscar Lanford III يقوم بأبحاث في الهيولية، فمضى للقائه. واستمع إليه لانفورد بأدب، ثم قال إنه لا يوجد بينهما ما هو مشترك، فهو يحاول فهم فايجنباوم.

وتساءل فارمر، أين حصافة الرجل؟ إنه مُغرم بهذه المسارات، ونحن في خضمّ نظرية المعلومات بكل ثرائها، نعزل الهيولية، ونسمع نبضها، ونحاول ربط الإنتروبيا ورقم لايبنوف بالوسائل الإحصائية.

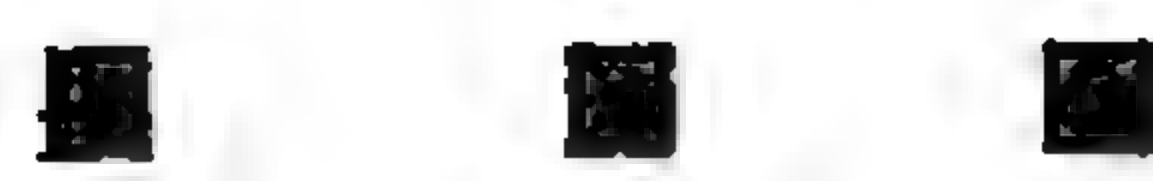
في حديثه مع فارمر، عرض لانفورد لمفهوم العمومية، ولم يدرك فارمر إلا مؤخراً أنه قد فاتته ملاحظة هذا المعنى "يالها من سذاجة مني، إن العمومية أكثر من مجرد نتيجة رائعة، فهي تضمن توظيف جيش متعطّل من باحثي الظواهر الحرجة critical phenomena.

فحتى هذه اللحظة كانت النظم الديناميكية تدرس كل حالة على انفراد، إذ لم يكن في إمكاننا أن نقوم بما يتم عمله في النظم الخطية، حيث توضع مبادئ عامة قابلة للتطبيق على كافة الحالات. هذا ما حققته العمومية.

كما أن هناك عاملاً اجتماعياً له أثره، فميشيل قد صاغ نتائجه بلغة إعادة الاستنظام، والتي يتقنها دارسو الظواهر الحرجة. هؤلاء القوم كانوا يمرون بظروف صعبة، حيث لم يعد هناك من الظواهر ما تسحق الدراسة. كانوا يبحثون في كل مكان عن مجال يمارسون فيه علمهم. ثم جاء فايجنباوم ليقدم حقيقة ملأى بالعجائب، أقرزت العديد من المجالات.

على أن دراسي سانتا كروز قد قاموا بوضع بصمتهم الخاصة بهم بأنفسهم. فقد ارتفع شأنهم داخل القسم بعد حضورهم المثير لاجتماع تم في منتصف شتاء ١٩٧٨، نظّمه برناردو هيرمان Bernardo Heberman من معمل زيوركس للأبحاث في بالو ألتو، والتابع لجامعة ستانفورد، عن فيزياء المواد المتكاثفة condensed matter physics. لم

يكن أفراد المجموعة مدعوين، ولكنهم حضروا على أية حال، مكدسين أنفسهم في سيارة شو الفورد من طراز ٥٩، المعروفة في المنطقة باسم "الحلم الكريمي". وتحسباً للظروف، أخذوا معهم شاشة وجهاز عرض فيديو. وعند اعتذار لأحد المحاضرين، دعا هيرمان شو لإلقاء كلمة. كان الوقت محدداً بدقة، وكانت الهيولية قد أضحت كلمة مثارة في الأفق، ولكن لم يكن يفهم معناها من بين الحضور إلا نفر قليل. وبدأ شو يشرح الجاذبات في فضاء الطور، أولاً نقطة، حين يكون النظام في حالته المستقرة، ثم في شكل منغلق، حين يكون النظام متذبذباً في دورة مستقرة، ثم جاذب غريب في الحالات الأخرى. وساعدته أجهزة العرض على سحر أعين الناس، على حد قوله. قدم لهم جاذب لورنز، وصنبره ذا المياه المتساقطة، شارحا الجانب الهندسي، كيف تبدو الأشكال حين تمط أو تطوى، وكيف يُترجم ذلك في نطاق نظرية المعلومات المحترمة. كانت كلمة رائعة بكل المعايير، وأمكن للحضور أن يروا الهيولية لأول مرة تُعرض بأعين زملائهم من سانتا كروز.



في عام ١٩٧٩ حضر أفراد المجموعة المؤتمر الثاني عن الهيولية، في أكاديمية نيويورك للعلوم، هذه المرة كمدعوين، وكان الموضوع قد أخذ احترامه اللائق. كان اجتماع ١٩٧٧ خاصاً بلورنز، ولم يحضره إلا بضعة عشرات، أما هذا الاجتماع فكان خاصاً بفياجنيباوم، وحضوره بالمئات. وبينما لم يكن باستطاعة شو في الاجتماع الأول تدبير آلة كاتبة لنسخ بحث يدسه تحت أبواب القوم، كان لمجموعة النظم الديناميكية الآن مطبعة تلاحق بالكاد أبحاثهم.

ولكن الجماعة لم تكن لتستمر للأبد، فكلما كان الاقتراب من الحياة العلمية الحقة، كان الإيذان باقتراب تفككها. ذات يوم طلب هيرمان شو، ولكنه وجد كرتشفيلد. كان هيرمان بحاجة لمعاون في بحث عن الهيولية، وكان كرتشفيلد، أصغر الجماعة سناً، مشغول البال حول مستقبله. ومن جهة كان هيرمان يتمتع بكل المزايا التي يفتقدها دارس الفيزياء، ومن جهة أخرى كان بحاجة لحاسوب، وقد تمكن كرتشفيلد من إنجاز العمل له في ساعات. أرادت الجماعة أن تتدخل في العمل بصفتها، ولكن هيرمان رفض، لقد كان يريد معاوناً لا أكثر.

وحين ظهر البحث في إحدى المجلات العلمية المحترمة، كان إنجازاً ضخماً لكرتشفيلد، ولكنه بداية الغيث لانحلال الجماعة لينخرط أفرادها في

العالم الرحب. فقد استشاط فارمر غيظاً، متهما كرتشفيلد بالانشقاق وتشبیط روح الجماعة.

ولم يكن كرتشفيلد هو الوحيد فى العمل خارج الجماعة، ففارمر ذاته، وباكار، كانا على اتصال بالشخصيات المؤثرة من الفيزيائيين والرياضيين، مثل سوينى ويورك. إن الأفكار التى نبعت فى بوتقة سانتا كروز قد أضحت جزءاً راسخاً من إطار الدراسات الحديثة للنظم الديناميكية. فحين كان فيزيائى يجمع مجموعة من البيانات، ويريد أن يقدّر ما لها من أبعاد أو إنتروبيا، فإن التعاريف والأساليب الملائمة تكون هى ما ابتدعته الجماعة فى فترة حياتها الأولى. كان علماء الطبيعة الجوية يتجادلون عما إذا كانت هيولية الطقس ذات أبعاد لا نهائية، كما يذهب الفكر التقليدى للنظم الديناميكية، أم تخضع لجاذب غريب ذى عدد محدود من الأبعاد. ومحلولو الاقتصاد يحاولون البحث عن جاذب عجيب فى تحليل بيانات البورصة، بأبعاد تساوى ٣.٧ أو ٥.٣، فكلما قلّت الأبعاد زاد النظام بساطة. العديد من الخصوصيات فى الرياضيات تتطلب التصنيف والفهم؛ البعد الكسرى، بعد هاوسدورف Hausdorff، رقم ليابونوف، البعد المعلوماتى information dimention، هذه الدقائق من خصائص النظم الهيولية قد شرّحت بشكل أفضل عن طريق شو ويرك. ويعد الجاذب هو أول مستوى من المعرفة مطلوب لتوصيف خصائصه. فهو الخصيصة التى تعطى كمية المعلومات الضرورية لتوصيف موضع نقطة على الجاذب فى إطار درجة دقة معينة. وقد ربطت الطرق التى تولدت فى سانتا كروز هذه الأفكار بالخصائص الأخرى المهمة للنظم، مُعدّل انخفاض القابلية للتنبؤ، معدل تدفق البيانات، الميل لخلق التمازج. أحيانا كان العلماء حين يستخدمون هذه الطرق يجدون أنفسهم يوقعون البيانات، يرسمون مربعات صغيرة، ويحصون عدد النقاط فى كل مربع. على أن هذه الطرق التى تبدو بدائية قد قربت من فهم الهيولية لأول مرة.

فى نفس الوقت، فإنه بتعلم النظر للجاذبات الغريبة فى الأعلام الخفاقة وفى الاهتزازات الميكانيكية، فإن العلماء قد حققوا نجاحاً فى تشخيص الهيولية التحديدية فى كافة ثنايا الفيزياء. الشوشرة غير المتوقعة، والاهتزازات الغريبة، والخط بين المنتظم وغير المنتظم، ظهرت كل هذه التأثيرات فى بحوث لمجربين يعملون فى كل مجال، من المسرعات إلى الليزر إلى وصلة جوزيفسون. كان علماء الهيولية يجعلون التشخيص شيئاً خاصاً بهم، فيمكن أن يبدأ بحث بالعبارة التالية: "لقد تلاحظ فى مذبذب وصلة جوزيفسون وجود شوشرة ترتفع فجأة، ليست معللة بالتذبذبات الحرارية."

وفي الوقت الذي غاشرت فيه الجماعة، رأى البعض أن سانتا كروز قد فقدت الفرصة لأن تكون مركزاً قومياً رائداً في مجال دراسات الديناميكا غير الخطية، يسبق المراكز التي أنشئت في هذا المجال. وفي بداية الثمانينات، كان كل فرد من المجموعة قد شق طريقه الخاص بعد تخرجه. شو عام ١٩٨٠، فارمر ١٩٨١، باكار ١٩٨٢، وكرتشفيلد ١٩٨٣ من بينهم، كان شو هو الذي لم يتابع المجال، فظل إسهامه مقصوراً على بحثين، ذلك الذي أكسبه رحلة باريس، ثم الذي ضم أبحاث الجماعة عن الصنوبر، والذي يلخص عملها. بل إنه قد هجر المجال العلمي كلية، فهو كما قال عنه أحد أصدقائه، كان لا يستقر على حال.

-
- أ اختلفت الاجتهادات في القواميس التخصصية لوضع مقابل لهذا المصطلح بين: إضافة، حشو، زيادة، إطناب، والمقابل الوارد في المتن من اجتهاد المترجم، على أساس إبراز أن هذه الإضافة خالية من أي معنى، ولكن قيمتها في نظرية المعلومات أنها تساعد على اختبار عملية النقل، مما يمكن من وضع النظم ذاتية الاختبار، أو ذاتية التصحيح، بالنسبة للأخطاء في نقل المعلومات. المترجم.
- ii تقوم نظرية المعلومات على مبدأ بسيط وبديهي، إن قيمة المعلومة تكمن في درجة عدم احتمال الخبر الذي تنقله، فقولك بأن الشمس سوف تسطع غدا يحمل قيمة في الشتاء أكبر منها في الصيف (يعبر عن ذلك رجال الإعلام بأن القول بأن كلباً عض رجلاً لا يصلح خبراً صحفياً، بعكس القول بأن رجلاً عض كلباً). فإذا كانت ظاهرة دورية تماماً، فإنه بعد الدورة الأولى يكون أية معلومة عنها تساوى الصفر في قيمتها، أما إذا كان الحدث غير متوقع بالمرّة، فإن المعلومة عنه تكون كبيرة جداً. ولئن به شغف بالرياضيات نقول إن الصيغة الرياضية التي وضعها شانون لقيمة المعلومة يجعلها تتناسب مع اللوغاريتم الطبيعي للاحتمال، فإذا كان الاحتمال مؤكداً، أي $=1$ كانت قيمة المعلومة صفراً، وإذا كانت المعلومة غير متوقعة بالمرّة، كان الاحتمال لها صفراً، وقيمة المعلومة قيمة قصوى. المترجم.
- iii يتم نقل البيانات بالطريقة الثنائية عن طريق نبضات كهربائية، ويقصد بـ"نعم" أن النبضة موجودة، و"لا" النبضة غير موجودة. المترجم.
- iv الواحد يعبر عن وجود النبضة، والصفر عن أنها غير موجودة- المترجم.

الإيقاعات الداخلية

نظر برناردو هيرمان Bernardo Huberman إلى الجمع من مستمعيه من البيولوجيين والفيزيائيين والرياضيين والأطباء، وأيقن على الفور أنه سوف يواجه مشكلة في عملية الاتصالات. كان قد فرغ لتوه من إلقاء حديث غير عادي في اجتماع غير عادي، المؤتمر الأول للهيولية في مجال البيولوجيا والطب، عُقد تحت رعاية مشتركة من أكاديمية نيويورك للعلوم، والمعهد القومي للصحة النفسية، ومكتب الأبحاث البحري. وقد شاهد هيرمان في قاعة المؤتمر وجوها لأشخاص مرموقين في المجال، وجوها غير مألوفة أيضاً. كان المؤتمر يقترب من نهايته، فقد كان اليوم الأخير منه.

كان هيرمان، الذي ظل مواصلاً طريقه في أبحاث الهيولية منذ تعاونه مع جماعة سانتا كروز، باحثاً في مركز زيوركس للأبحاث في بالو ألتو. ولكنه كان أحياناً يغمس في أبحاث تخرج عن نطاق المركز. وفي هذا المؤتمر كان قد ألقى كلمة عن نموذج يشرح حركة العينين لمريض الشيزوفرانيا.

لقد تجادل علماء النفس طويلاً حول تعريف الشيزوفرانيا والمصابين بها، ولكن المرض ظل عصياً على التعريف، كما هو على العلاج. فأهم أعراضه تبدو على العقل وعلى التصرف. فحين يحاول المريض أن يتابع حركة بندول، فإنه يفقد القدرة على المتابعة، بينما العين في الشخص السليم قادرة على المتابعة لفترة طويلة، كثيراً دون إدراك من الشخص نفسه، فالصور المتحركة تظل مجمدة على الشبكية لفترة ما. أما عين المريض بالشيزوفرانيا فلا تفتأ تقفز قفزات سريعة، تسرع أو تبطئ عن الصورة المتحركة، ولا يعرف أحد السبب.

وقد جمع الأطباء قدراً كبيراً من البيانات على مرّ السنين، صنفوها في قوائم أو بينوها على أشكال توضح أنماط هذه الحركة الغريبة من العينين. وقد افترضوا عامة أن ذلك بسبب اضطرابات شاذة في الإشارة القادمة من الجهاز العصبي إلى العضلة المتحركة في حركة العين. كما افترض أيضاً وجود اضطرابات في المخ تظهر في العينين. ولكن الفيزيائي هيرمان كان له رأي آخر، وقدم نموذجاً متواضعاً.

لقد فكّر في أبسط صورة لحركة العين، وكتب معادلة لها، تتضمن معاملاً لسعة تذبذب البندول، ومعاملاً لتردده، ومعاملاً للقصور الذاتي للعين، ومعاملاً للاحتكاك بها، وكذا معاملاً تصحيحياً للخطأ، لتجعل العين مثبتة على الهدف.

وكما شرح هيرمان لمستمعيه، فإن المعادلة تصف حركة نموذج ميكانيكى مشابه، كرة تتدحرج على مستوى منحني على هيئة السرج، بينما السرج ذاته يتأرجح ذات اليمين وذات الشمال. تمثل حركة الكرة من جانب لآخر الحركة الترددية للبندول، بينما تمثل حوائط السرج خاصية التصحيح، والتي تحاول جذب الكرة إلى القاع. وقد أجرى هيرمان حسابات معادلاته لساعات على الحاسوب، مغيراً من المعاملات ومستخرجاً الأشكال البيانية، وقد وجد في التصرفات الناتجة كلاً من الانتظام ومن الهلولية. فمع معاملات معينة تكون حركة العين منتظمة، ولكن عند معاملات أخرى تدخل الحركة في تتابع سريع من تضاعف الفترات، مما ينتج عدم الانتظام الذي لا يختلف عما وُصف في أبحاث العلماء.

وفي النموذج، ليس للحركة الشاذة أية علاقة بمؤثرات خارجية. إنها نتيجة حتمية لزيادة اللاخطية في النظام ذاته. وبالنسبة لبعض الأطباء الحاضرين، كان نموذج هيرمان يوافق نموذجاً عاماً مقنعاً عن المصابين بالمرض. فعدم الخطية، والتي يمكن أن تؤدي لاستقرار النظام كما تؤدي لاضطرابه، بحسب قوتها أو ضعفها، قد تكون ذات صلة بظاهرة مرضية عامة. فقد أشار البعض الآخر أن ظاهرة اضطراب حركة العينين ليست مقصورة على الشيزوفرانيا، بل تتلاحظ في حالات عصبية أخرى كثيرة. فكل صور التصرفات الديناميكية، التذبذبات الدورية واللا دورية، كلها متاحة لمن يريد تطبيق مفهوم الهلولية، حتى في مجال الأمراض العصبية، حيث يتلاحظ أن الزيادة الشديدة في حامض اليوريك تتسبب في ظاهرة مرضية مشابهة خاصة بمرض النقرس.

رأى الحاضرون من العلماء آفاقاً جديدة للأبحاث تفتح أمامهم. على أن فريقاً منهم رأى أن نموذج هيرمان مغرق في التبسيط وعبروا عن ذلك حين جاء وقت طرح الأسئلة: "أريد أن أسأل عما يقود عملية النمذجة، لماذا البحث بالذات عن هذه العناصر للاخطية، أقصد التفرغ الثنائي والحلول المؤسسية على الهلولية؟".

يرد هيرمان بعد فترة صمت: "أوه، حسناً، يبدو أنني بالفعل قد فاتتني أن أوضح هذه النقطة. إنني كهيولي متخصص أعلم أن أبسط نموذج عام لنظام تتبعي يمكن كتابته يحتوي على هذه الخصائص، سواء أكان حالتنا هذه أم حالة هوائى يتتبع إشارة ما. إنها خصائص عامة لا تعتمد على تفاصيل المجال المطبقة فيه".

وينبرى آخر ثائراً ضد التبسيط المغالى فيه للنموذج، ومبينا أن الحالة الواقعية هي أن العين يحكمها أربع عضلات، ويدخل فى تفاصيل علمية غاية فى التعقيد يرى أن النموذج الحق يجب أن يحتويها. ويأخذ منظم الجلسة الكلمة قائلاً: "أرى أن على أن أعقب على الأمر. إن ما رأيناه اليوم هو أحد متخصصى الديناميكية اللاخطية الذين يبحثون فى النظم العامة قليلة الأبعاد، حين يتحدث إلى بيولوجى مسلح بأدوات رياضية. إن الفكرة فى الواقع هي وجود شمولية بين النظم، تظهر فى أبسط النماذج.

إن الحالة فى الحقيقة هي أن العلماء والأطباء حين يرون خمسين ألف حالة مختلفة، يصعب عليهم الاعتقاد بشئ ما مشترك فيما بينها جميعاً، ولكن ها قد أتى برنارد بنظامه المبسط، ليرىكم ما بإمكانه أن يفعله."

يرد هيرمان: "لقد حدث هذا بين علماء الفيزياء منذ خمس سنوات، ولكنهم اليوم جميعاً مقتنعون".



إن الأمر دائماً سيان، أن تصنع نموذجاً يماثل الحقيقة حق التمثيل، أو تصنعه مبسطاً سهل التداول، وإن السذج من العلماء هم فقط الذين يعتقدون أن النموذج المتكامل هو فقط الذى يمثل الحقيقة. إن نموذجاً كهذا يمكن أن يكون له نفس عيوب خريطة مسهبة فى التفاصيل، فتضيع معها الملامح العامة. فالخرائط والنماذج، يجب أن تكون التفاصيل بهما على قدر الحاجة الفعلية.

وبالنسبة لـرالف أبراهام، رياضى سانتا كروز، فإن مثالا لنموذج جيد للعالم الحى هو الذى يبنى على ما يسمى "فرض الجايا" الذى وضعه جيمس لفلوك James Lovelock مع لين مارجلز Lynn Margulis. فى هذا الفرض تخلق الشروط اللازمة لاستمرار الحياة بواسطة الحياة ذاتها، ويحافظ عليها بواسطة عمليات للحفظ التلقائى عن طريق تغذية خلفية ديناميكية. والنموذج من البساطة لدرجة أن يظن به البلاهة، الأرض مغطاة بنوعين من النباتات، أبيض وأسود، ثم صحراء، ثلاثة ألوان فقط هي الأبيض والأسود والأحمر تغطى سطح الكرة الأرضية. إن هذا النموذج على بساطته يبين لنا كيف يتم التوازن البيئى على سطح الكرة الأرضية، وكيف تنظم درجة الحرارة بما يسمح باستمرار الحياة.

النباتات البيضاء تعكس الضوء، مما يجعل الكوكب أكثر برودة، والسوداء تمتصه، فتقلل من درجة انعكاس الضوء، فتجعل الكوكب أكثر دفئاً. ولكن النباتات البيضاء

محتاجة لطقس أشد دفئاً، والسوداء محتاجة لطقس أكثر برودة. هذه الخصائص يمكن تمثيلها بمجموعة معادلات تفاضلية، تدخل للحاسوب لتتفاعل فيما بينها. إن مدى واسعا من الظروف الأولية يمكن أن يؤدي إلى جانب يعبر عن التوازن، ليس بالضرورة أن يكون توازنا استاتيكيًا.

يقول إبراهيم: إنه مجرد نموذج رياضي مبسط، فلست في حاجة لنماذج عالية التطابق مع الواقع للنظم البيولوجية أو الاجتماعية. كل ما عليك هو أن تحدد نسبة ما لانعكاس الضوء، ثم بعض الظروف الأولية، وتراقب ملايين السنين من التطور تمر أمام عينيك، وأن تعلم النشء أن يكونوا على دراية بما يجري على كوكب الأرض".

ويجد العلماء المغرمون بالأنظمة المعقدة مثلهم الأعلى متمثلاً في جسم الإنسان. لا يوجد على وجه البسيطة مثل هذا النظام الذي يُقدم ثروة من الحركات على كافة المستويات، المرئية وغير المرئية، من عضلات وسوائل وتيارات كهربية وخلايا وألياف. ولا يوجد نظام فيزيائي قابل للتجزئة مثل هذا النظام، كل جهاز له تركيبه وله كيميائيته، وقد قضى الباحثون سنوات وسنوات لمجرد وضع أسماء لأجزائه. ولكن، كم تستعصى هذه الأجزاء على الاستيعاب! قد يكون أحد الأجزاء عضواً ملموساً مثل الكبد، أو شبكة متشعبة مثل الجهاز الدوري، أو ربما شيئاً تجريدياً غير ملموس مثل الجهاز المناعي، وما به من أنظمة تكويد وفك التكويد لما يغزو الجسم من كائنات. إن دراسة نظم كهذه دون الإلمام التام بتشريحيها وكيميائيتها أمر غير مجدٍ، ولذا يدرس أطباء القلب طرق النقل الأيوني خلال الأنسجة العضلية، وأطباء المخ طرق القذح النيوروني، وأطباء العيون اسم وموضع كل عضلة للعين.

وفي عام ١٩٨٠ أدخلت الهيولية نوعاً جديداً من دراسة الفسيولوجيا (علم وظائف الأعضاء)، مبنياً على فكرة النماذج الرياضية المبسطة التي تعطي نظرات شاملة بصرف النظر عن التفاصيل. فينظر الباحث إلى الجسم كموضع للحركة والاهتزازات، ويضع الوسائل للاستماع إلى ما يصدر عنه من نبضات مختلفة. لقد اكتشفوا إيقاعات لم تكن متاحة عن طريق عينات الدم أو شرائح المجهر، ودرسوا الهيولية في اضطرابات الجهاز التنفسي، واستكشفوا آليات التغذية الخلفية التي تتحكم في كرات الدم البيضاء والحمراء. ووضع باحثو السرطان أفكاراً حول الدورية واختلال النظام في دورة نمو الخلايا. كما درس أطباء النفس أسلوباً متعدد الأبعاد لوصفات العقاقير المثبطة للاكتئاب.

ولكن الاكتشافات فى مجال عضو واحد فاق كل الاكتشافات، ألا وهو القلب، والذي تحدد إيقاعاته بكل دقة، مستقرة أو غير مستقرة، عادية أو مرضية، الفرق بين الحياة والموت.



كتب دافيد رول حين تصدى لوضع أفكار عن هيولىة القلب يقول: "إنه النظام القلبى نظام ديناميكى ذو أهمية حيوية بالغة، وهو فى حالته العادية نظام دورى، ولكن أمراضاً عديدة تتبع من عدم دوريته تؤدى إلى حالة ثابتة، ألا وهى الموت. ولعل قدراً كبيراً من الفوائد يمكن أن تستخلص من الدراسات الحاسوبية لنموذج رياضى واقعى يمكنه أن ينتج أنظمة ديناميكية قلبية مختلفة".

وتحمل عبء التحدى فرق من الباحثين فى كل من الولايات المتحدة وكندا. فالاضطرابات فى دقات القلب قد فحصت منذ أمد طويل، وصنفت تحت مسميات مختلفة، ويمكن تمييز الكثير منها بواسطة الأذن المدربة. كما يمكن للعين المدربة أن تقرأ الكثير عن طريق الرسومات البيانية لرسم القلب. ولكن علماء الهيولىة قد اكتشفوا مدى عدم ملائمة تلك التصانيف، حيث تمت بناء على ظواهر سطحية، متجاهلة أسباباً أكثر عمقا.

لقد اكتشفوا ديناميكية القلب، وكانت تخصصاتهم فى الغالب غير مألوفة. فليون جلاس Leon Glass من جامعة مكجل McGill فى منتريال بكندا كان متخصصاً فى الفيزياء والكيمياء، حيث أبدى شغفا بالأرقام وباختلال النظم، وأتم رسالة الدكتوراة فى موضوع الحركة الذرية داخل السوائل قبل أن يتجه لأبحاث اضطرابات القلب. يقول جلاس: "إن الإحصائيين يشخصون الأمراض المتعلقة بالقلب بالنظر إلى قصاصة لرسم القلب، يميزون بها أنماطاً من الاختلالات، تعلموها فى مراجعهم. إنهم فى الواقع لا يملكن ملكة تحليل ديناميكية هذه الإيقاعات، بينما هى على درجة من الثراء أكثر مما يتصوره إنسان بالرجوع إلى المراجع".

وفى كلية الطب بجامعة هارفارد، يعتقد آرى جولدبرجر Ary Goldberger مساعد مدير مركز أبحاث اضطرابات القلب فى مستشفى بث إسرائيل أن أبحاث القلب قد أصبحت تمثل صلة بين الأطباء والرياضيين والفيزيائيين، حيث يقول: "إننا الآن فى المقدمة، أمامنا طراز جديد من الظواهر. فحين نرى التفرع الثنائى، والتغيرات الفجائية فى التصرفات، لا نجد فى الفكر التقليدى شيئاً يفسر ذلك، فمن الواضح أننا بحاجة إلى نماذج جديدة للقيام بهذا التفسير". كان على جولدبرجر ورفاقه أن يكسروا

الحواجز بين اللغات العلمية والتصانيف الأكاديمية. كانت العقبة الأولى في نظره هي عدم تقبل أغلب الأطباء للرياضيات، ويقول في ذلك: "في عام ١٩٨٩، لم يكن لك أن تقابل كلمة "فراكتال" في أي مرجع طبي، وأعتقد أنه بحلول ١٩٩٦ لن تقابل مرجعاً طبياً لا يحتوى على هذه الكلمة!"

إن الطبيب حين يستمع لدقات القلب، يسمع تصادم سائل من سائل، وسائل مع جسم صلب، وجسم صلب مع آخر، فالدم يسرى من غرفة لأخرى، تدفعه من الخلف عضلات تنقبض، ويجذبه إلى الأمام جدران تنبسط، ويصدّه عن الرجوع صمامات تتقفل بكل قوة. وانقباضات العضلات في حد ذاتها تعتمد على موجات كهربية معقدة ثلاثية الأبعاد. ونمذجة جزء من أجزاء القلب بكل أمانة يتجاوز قدرة أقوى حاسوب متصور، أما نمذجة النظام ككل فشئ خارج عن التصور. إن النمذجة الحاسوبية على غرار ما يفعله مهندسو الطيران في شركة بوينج أمر خارج عن المألوف بالنسبة للأطباء.

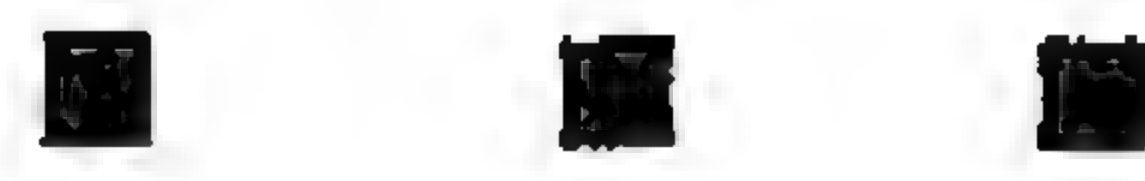
إن التجربة والخطأ كانا هما الوسيلة لتصميم الصمامات الصناعية المصنوعة من قطع من المعدن والبلاستيك، والتي تنقذ حياة من يستخدمها اليوم. على أن الأمر يحتاج لما يشبه صمام القلب الطبيعي، تركيبة رقيقة مرنة من ثلاثة كئوس. ولكي يسمح للدم بالدخول إلى غرفة الضخ في القلب، يجب أن ينفتح الصمام في رفق، ولكي يمنع الدم من الرجوع، يجب أن ينقفل الصمام بإحكام بفعل ضغط الدم، وأن يقوم بهذه المهمة دون أن يجهد أو يبلى عدة بلايين من المرات. ولكن المهندسين لم يتقنوا عملهم في هذا المجال، فالصمامات القلبية كانت تصمم على طراز أعمال السباكة، وكانت مشكلة الإجهاد والتسرب من الصعوبة بمكان. إن الدم حين يتدفق تعثره بعض الدوامات، يمكن أن ينتج عنها جلطات غاية في الخطورة على الإنسان. فقط في عام ١٩٨٠ أمكن الاستفادة من تقنية النمذجة الحاسوبية في تصميم صمامات القلب. لقد أنتج الحاسوب صوراً متحركة، ثنائية الأبعاد في الواقع، ولكنها معبرة تماماً، تسرى بها مئات النقاط تمثل جزيئات الدم وهي تعبر الصمامات، وتضغط على جدران القلب المرنة، ولكنها معبرة تماماً، تسرى بها مئات النقاط تمثل جزيئات الدم وهي تعبر الصمامات، وتضغط على جدران القلب المرنة، وتنتج الدوامات. وقد وجد الرياضيون أن القلب يضيف المزيد من التعقيد، بتأثيره على الجدران المرنة منه، فالأمر يختلف عن تصادم الهواء بجناح الطائرة الصلب مثلاً، ففي حالة القلب يتأثر السطح في صورة ديناميكية لا خطية.

أما الأمر الأكثر خفاءً وخطورة فهو حالات لفظ القلب arrhythmias، ومن صورها الارتجاف البطيني ventricular fibrillation الذي يتسبب في وفاة الآلاف في الولايات المتحدة فقط، وهي تنتج عن شيء يعرفه الأطباء، انسداد في الشرايين يؤدي إلى موت العضلات الضاخة. الكثير من هذه الحالات تنتج عن تعاطي المخدرات أو الأدوية الكيميائية أو الضغط العصبي أو غير ذلك من أسباب، ولكن في حالات أخرى يظل السبب غامضاً. فحين يواجه الطبيب حالة من الارتجاف البطيني، يود لو يرى سبباً ملموساً يعالجه، فالمريض السوي الذي يجتاز هذه الأزمة يكون عرضه لتكرارها.

في حالة القلب السليم، تجري عمليات انقباضات وانبساطات العضلات بنظام دقيق، طبقاً لوصول موجات كهربائية ثلاثية الأبعاد، تعمل متوافقة مع بعضها البعض تماماً، ولكن في حالة الارتجاف البطيني، يفقد هذا التوافق، فيختل النظام، ويفشل القلب في عملية الضخ المنتظم.

ومن الأشياء المحيرة أنه في حالة الارتجاف البطيني، يعمل كل جزء على انفراد بصورة طبيعية، مستجيباً لما يرد إليه من موجات. لهذا السبب يرى علماء الهيولية أن أسلوباً جديداً لفحص الموضوع يجب التفكير فيه، الأجزاء سليمة، ولكن المنظومة في مجموعها مختلة. إنها صورة من اضطرابات النظم المعقدة، بالضبط كالاختلال العقلي، بصرف النظر عن وجود أسباب كيميائية من عدمه، فهي اضطراب في نظام معقد.

إن يكف القلب عن اللفظ من تلقاء نفسه، فهذه الصورة من الهيولية مستقرة، ويحتاج الأمر إلى صدمة يعرفها متخصصو النظم الديناميكية لكي يعود القلب لحالته الطبيعية. وقد كان تصميم هذه الصدمة من حيث قوتها وشكلها أمراً تجريبياً بحتاً، إذ لم تكن توجد نظرية عن هذا الأمر. لقد اكتشف الآن أن بعض الفروض لم تكن صحيحة. وفي حالات اضطرابات أخرى استخدمت العقاقير، أيضاً بطريق التجربة والخطأ، فبدون فهم جيد لديناميكية القلب، من الصعب التنبؤ بتأثير أي عقار. إن قدراً كبيراً من المجهودات قد بذل لفهم التفاصيل بكل دقة، فقط الجانب الآخر من القضية لم يبذل فيه الجهد الكافي، فهم المنظومة ككل.



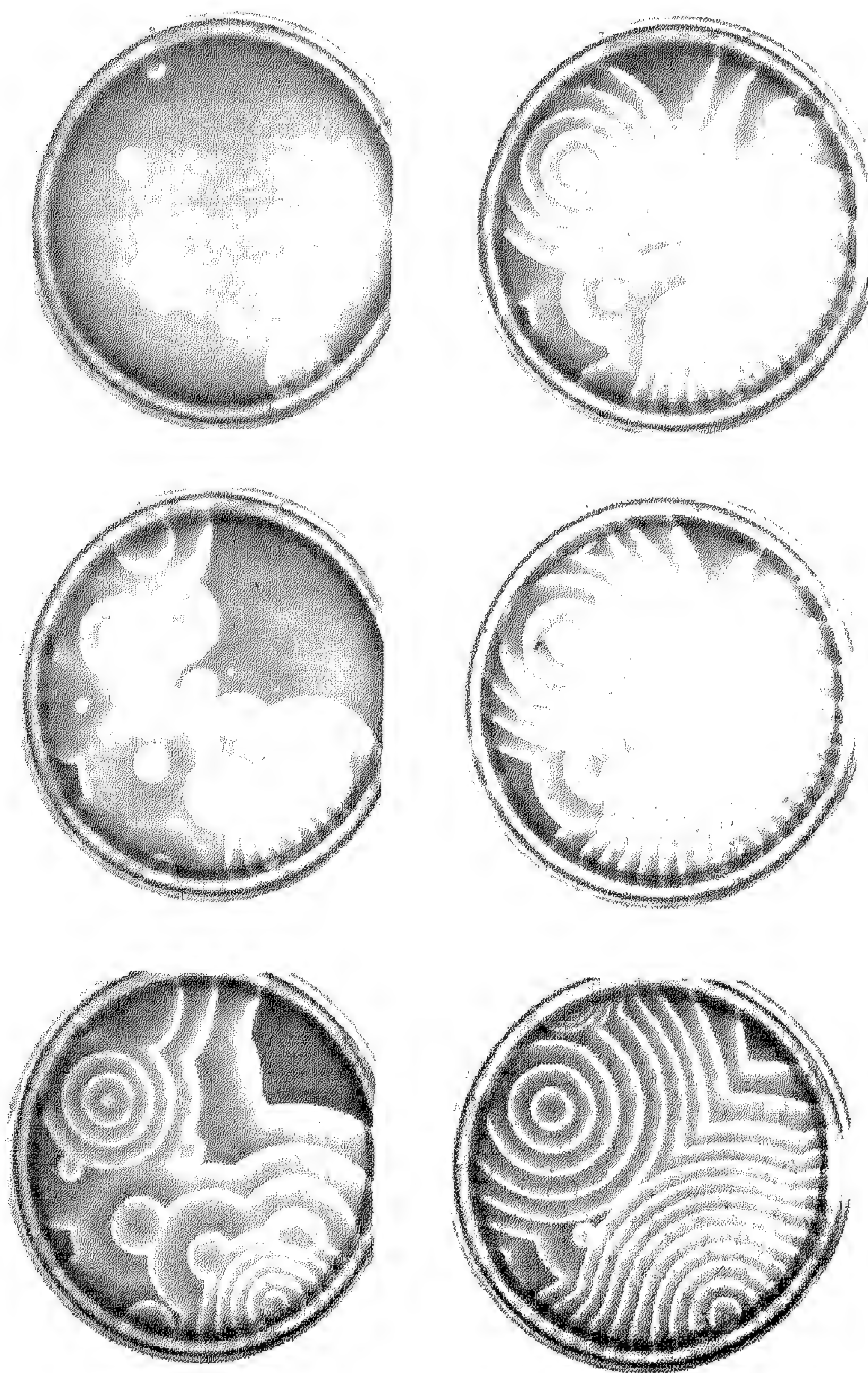
جاء وينفري Winfree من عائلة لم يتخرج أحد منها من الجامعة، وقد كان والده كثير التجوال بالأسرة، مما أدى به إلى أن يلتحق بأكثر من مدرسة قبل أن ينهي دراسته

المتوسطة. كان يسيطر عليه حب البيولوجيا والرياضيات، ولما لم يجد بين الاثنين رابطة، قرر أن يتخذ لنفسه طريقاً خاصاً. لقد درس الهندسة الفيزيائية لخمس سنوات في جامعة كورنل، تعلم خلالها الرياضيات التطبيقية وكماً كبيراً من الأساليب العملية، بعد ذلك أتيح له أن يحصل على درجة الدكتوراة في البيولوجيا من جامعة برنستون، وذلك عن طريق الدراسة عن بعد، بينما كان يقوم بالتدريس في جامعة شيكاغو.

كان طرازاً فريداً بين البيولوجيين، يستخدم حاسته الخاصة تجاه الهندسة خلال عمله في المواضيع النفسية. وقد بدأ في السبعينات دراساته عن الديناميكا البيولوجية. بادئاً بالساعة البيولوجية، موضوع يبحث تقليدياً في مجال دراسة سلوك الحيوان. كان من وجهة نظره أن هذا الموضوع يجب أن يدرس من زاوية رياضية، يقول في ذلك: "لقد درست باستفاضة النظم الديناميكية اللاخطية، وتأكدت أن المسألة من الممكن، بل من الواجب، إما أن ننتظر حتى يفرغ البيولوجيون من وضع تصور لها، وإما أن ندرس تصرفاتها على ضوء نظرية النظم المعقدة واللاخطية والديناميكا الطوبولوجية، وهذا ما قمت به."

كان له ذات يوم معمل مليء بالبعوض في أقفاسه، وكما يعلم كل من ابتلى بلدغاته، فهو يحرم عند الغسق من كل يوم. وحين ضبطت درجة الحرارة بحيث لا تبين الليل والنهار، اتضح أن الساعة الداخلية للبعوض ليس قوامها الأربع والعشرين ساعة المعتادة، بل ثلاث وعشرون. أما ما يجعله متوافقاً مع يومنا المعتاد، فهو جرعة الضوء الذي يتلقاه، فهو يعيد بها ضبط ساعته.

وعن طريق تسليط الضوء، أمكن له أن يقدم أو يؤخر من ساعة البعوض البيولوجية. وقام برسم التأثير مقابل توقيت الجرعات، وبدلاً من أن يبحث الأمر من زاوية الكيمياء البيولوجية، نظر إليه من زاوية الطوبولوجيا، بمعنى أنه بحث في الجوانب الوصفية للبيانات، بدلاً من الجوانب الكمية. ثم وصل إلى نتيجة مذهلة: توجد نقطة تفرد singularity في الشكل الهندسي، نقطة تختلف عن جميع النقاط، توقع أن تكون ذات وضع خاص، فهي التوقيت المضبوط الذي معه تنهار الساعة البيولوجية للبعوض تماماً، وأية ساعة بيولوجية أخرى.



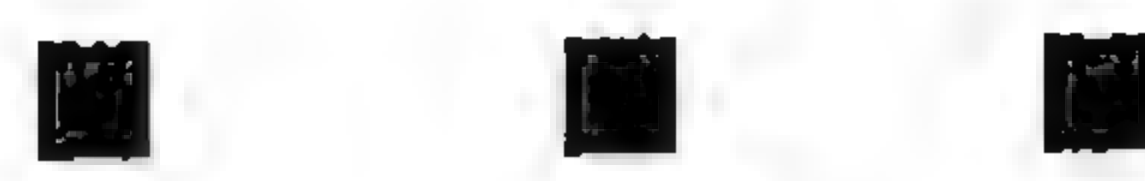
شكل ١٠-١ الكيمياء الهولوية: هذه التموجات متحدة المركز أو اللولبية، والتي تنتشر إلى الخارج، هي علامات للهولوية وشوهدت في تفاعلات كيميائية عديدة، مثل تفاعل Beluzov-Zhabotinsky. وقد وضع آرثر وينفري نظرية بأن مثل هذه الموجات تشبه موجات النشاط الكهربى التى تعبر عضلات القلب، بانتظام أو عن عدم انتظام.

وكان التوقع مُدهشاً، ولكن التجارب أيدته؛ "تدخل في منتصف الليل، وتُعطي البعوض جرعة محسوبة من الضوء، فتوقف ساعته البيولوجية، فتراه يحوم عشوائياً، ويظل كذلك طالما كان لك صبر على المراقبة، أو تعطيه جرعة ضوء أخرى. لقد سببت له دوارا أزمياً. في بداية السبعينات، لم يثر أسلوب وينفري الرياضى فى دراسة الساعة البيولوجية اهتماماً يذكر، كما كان من الصعب مدّ نطاق تجاربه على نوع راق من الكائنات لا يقبل البقاء فى قفص لشهور طويلة.

ظل موضوع الاضطراب الذى يصيب الناس نتيجة للتغير فى التوقيت بعد رحلات السفر الطويلة من الموضوعات المستعصية على الحل بالنسبة للبيولوجيين. وقد جمع الباحثون كمّاً وافراً من البيانات لعينات من البشر، خاصة من الطلبة والمتقاعدين، أو الأدباء والكتّاب حين يكون أمامهم عمل مطلوب إتمامه، ممن يقبلون بضع مئات من الدولارات فى الأسبوع لقاء المعيشة فى «عزلة عن الوقت» دون ضوء نهار، أو تغير فى درجة الحرارة، أو ساعات، أو هاتف. فالناس يتمتعون بدورة للنوم والاستيقاظ ودورة لدرجة حرارة الجسم. كلتا الدورتين عبارة عن مذبذب لاخطى يستعيد توقيته بعد شئ قليل من الاضطراب. وفى العزلة، حيث لا يوجد مؤثر يعيد ضبط الوقت، بدت دورة الحرارة وكأن مدتها خمس وعشرون ساعة، حيث تنخفض الحرارة خلال النوم. ولكن اتضح للباحثين أنه بعد أسابيع من العزلة فإن دورة النوم تنفصل عن دورة درجة الحرارة، وتصبح شاذة، فيظل المرء لعشرين أو ثلاثين ساعة مستيقظاً، ثم يتلو ذلك نوم لعشر أو عشرين ساعة. ولا يحس المرء بأن يومه قد طال لهذه الدرجة، بل ويرفض تصديق ذلك حين يخبر به.

ولم يبدأ تطبيق أسلوب وينفري على الادميين إلا فى منتصف الثمانينات، أما بالنسبة إلى وينفري نفسه، فقد تحول إلى دراسة نبضات القلب، وكان تحوله بعد رؤيته اثنين يموتان أمام عينيه بالسكتة القلبية، فى الواقع، لم يكن ليقول إنه قد تحول إلى تلك الدراسة، فالدراسة لم تتغير فإن اختلفت الكيمياء، فالديناميكا واحدة.

لماذا يتحول قلب هكذا فجأة، بعد أن استمر لبلايين المرات بين انقباض وانبساط، وتسارع وتباطؤ، لا يكل ولا ينقطع عن خفقاته إلى هذا الاضطراب المميت فى دوراته؟



قصّ وينفري القصة على جورج مينز George Mines أحد الباحثين القدامى فى جامعة ماكجل بمونتريال. وتمكّن مينز من صناعة جهاز صغير عالى الدقة لإنتاج

نبضات كهربية للقلب. يقول وينفري: "حين قرر مينز أن الوقت قد حان لإجراء البحوث على الكائن البشري، اختار أقرب انسان تحت يديه، هو نفسه، وحين دخل مساعد العمل صباحا، وجده مسجى على الارض، لاتزال الأجهزة الموصلة تقوم بدورها فى تسجيل بيانات النبضات وهى تتضاءل رويدا رويدا، بينما هو فى حالة من الغيبوبة لم يفق منها إلى أن فاضت روحه".

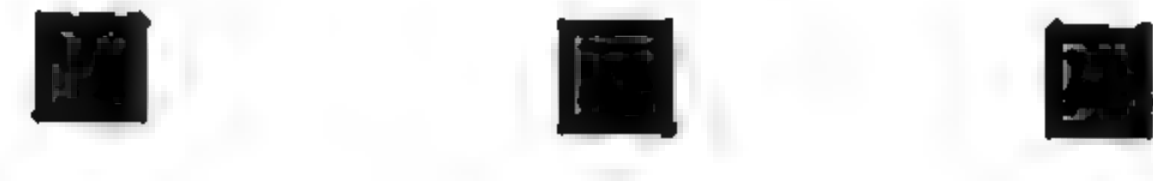
للإنسان أن يتوقع أن نبضة صغيرة للغاية، ولكن فى توقيت محدد بدقة عالية تماماً، يمكن أن تضع القلب فى حالة الارتجاف البطيئ، ولعل مينز نفسه قد أدرك ذلك، قبيل دخوله فى الغيبوبة. أما النبضات غير الموقوتة فقد تصل قبل أو بعد النبضة التالية بقليل، بالضبط كما يحدث فى الساعة البيولوجية. ولكن الاختلاف الجوهرى بين القلوب والساعات البيولوجية، أن القلب شئ ملموس، يمكنك أن تمسكه بيدك، وأن تتبع الموجات الكهربائية ثلاثية الأبعاد بداخله.

ولكن ذلك يتطلب عبقرية خاصة. لقد قرأ رموند آيدكر Raymond E. Ideker من كلية طب جامعة ديوك Duke مقالا لوينفري فى *Scientific American* عام ١٩٨٢، ولاحظ أربعة تنبؤات حول استثارة وإيقاف الارتجاف البطيئ مؤسسة على الديناميكا اللاخطية والطبولوجيا، ولم يصدقها آيدكر فى الواقع، إذ بدت افتراضية بصورة كبيرة، علاوة على كونها، من وجهة نظره متخصص فى القلب، على درجة عالية من التجريد. على مدى ثلاث سنوات، تحققت النبوءات الأربع، وأصبح آيكر منكباً على برنامج متقدم لجمع بيانات أكثر ثراء لوضع منهج مؤسس على نظام ديناميكي لأبحاث القلب. كان، على حد قول وينفري، "المقابل للسيكلوترون" فى أبحاث القلب.

يقدم راسم القلب التقليدى عاما وحيد البعد، وخلال عملية القلب يمكن للجراح أن يأخذ إلكترودا ويمرره من موضع لآخر فوق القلب، جامعا صوراً تصل لخمسين أو ستين خلال عشر دقائق، وبذلك يحصل على صورة تجميعية. أما خلال الارتجاف البطيئ، فهذا الأسلوب غير مجدٍ، حيث تكون سرعة الارتجاف عالية للغاية. وقد كان لجهاز آيدكر، فى نظامه المؤسس على حاسوب يتابع الوقت الحقيقى real time، ١٢٨ ألكترودا على شبكة يمكن وضعها على القلب، تسجل الجهود الكهربائية لكل موجة تصل لعضلة، ويخرج الحاسوب صورة قلبية.

كان هدف آيدكر المباشر، بالإضافة إلى اختبار فروض وينفري، هو تحسين الجهاز الكهربى الذى يوقف الارتجاف البطيئ. ففريق الحالات الحرجة يحمل جهازا مستعداً لإنتاج صدمة قوية من التيار المستمر خلال حنجرة الشخص المصاب، وتجريبياً،

صمم خبراء القلب جهازاً صغيراً يمكن دسُّه في الصدر للأشخاص الذين يُظنّ تعرّضهم لهذا الخطر، رغم أن التعرّف على مثل هؤلاء الأشخاص يمثل تحدياً في حد ذاته. يظل هذا الجهاز قابعاً، يستمع إلى دقات القلب المنتظمة، إلى أن تأتي اللحظة التي تحتاج منه أن يصدر نبضته. وأخذ أيدكر يجمع المعلومات الفيزيائية التي تجعل من جهاز كهذا أقل اعتماداً على التخمين، وأكثر اقتراباً من العلم.



لماذا يجب أن يخضع القلب، ذو الأنسجة المتميزة، هذا هو السؤال الذي يحير العلماء في ماكجرل ومعهد ماساشيتش للتكنولوجيا.

أجرى ليون جلاس Leon Glass ورفاقه في مكجريل مجموعة أبحاث كانت حديث وقتها في كل عالم الدراسات المتعلقة بالديناميكا اللاخطية. لقد استخدموا تجمّعات دقيقة من خلايا أجنة الدجاج، بعمر سبعة أيام. هذه الخلايا الناقوسية، بعرض جزء لجهاز خارجي. كان النبض تماماً خلال المجهر. كانت الخطوة التالية إدخال نبضة خارجية، وقد تم ذلك من خلال إلكترود دقيق أولج في أحد الخلايا. كانت النبضة قابلة للتغير من حيث الشدة والإيقاع.

وأوجزت النتيجة في مجلة العلوم عام ١٩٨١ في العبارة التالية: "إن التصرفات الديناميكية الشاذة التي كشفت عنها الدراسات الرياضية والتجارب الفيزيائية يمكن بصورة عامة أن تكون موجودة في الذبذبات البيولوجية حين تضطرب دوراتها. "لقد رأوا تضاعف الفترة، نموذج النبضات يتفرع ثنائياً ثم يتفرع مرة أخرى، مع التغير في المثير. وقد وضعوا خرائط بوانكريه، وخرائط دائرية يقول جلاس: "عن طريق رياضيات اللاخطية يمكننا فهم الإيقاعات المختلفة وترتيباتها فهماً جيداً للغاية. إن تدريب أطباء القلب لايحتوى على رياضيات اللاخطية ولكن طريقنا في النظر لهذه المسائل هو الطريق الذي سوف يفعله الجميع في المستقبل".

وفي هذه الأثناء، وجد طبيب القلب والفيزيائي ريتشارد كوهين Richard Kohen في برنامج مشترك بين هارفارد وإم . آي . تي مدى واسعاً من تسلسلات تضاعف الفترات في الكلاب. وقد استخدم نموذجاً حاسوبياً، أجرى عليه اختباراً لأحد السيناريوهات، فيها تتكسر موجة النشاط الكهربى على جزر الأنسجة، يقول: "إنها لحظة واضحة لظاهرة فايجنباوم، ظاهرة منتظمة تحدث عند تحقق شروط الهولوية. وقد اتضح أن النشاط الكهربى للقلب له تشابه مع العديد من الأنشطة التي تنتج الهولوية".

كما عاد علماء مكجريل إلى البيانات القديمة التي جمعت عن النشاط غير العادى للقلب. فى أحد الأعراض المعروفة، تختلط نبضات شاذة مع أخرى عادية. وتفحص جلاس مع معاونيه هذه النماذج، وقاموا بإحصاء عدد النبضات العادية بنى النبضات الشاذة. كان العدد يختلف من شخص لآخر، ولكن لسبب ما كان العدد قريبا دائما، ولبعض الأشخاص، كان عدد النبضات العادية يتبع متسلسلة معينة ٢، ٥، ٨، ١١ ...

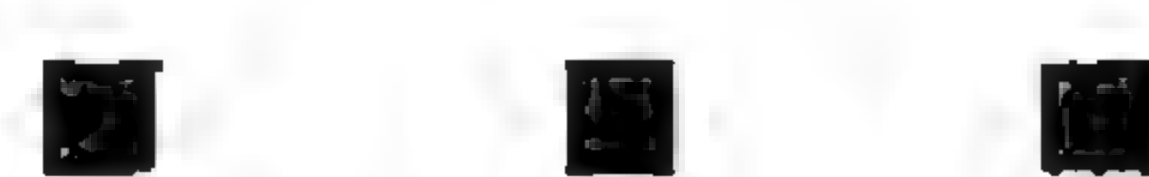
يقول جلاس: "قام البعض بمثل هذه الأعمال الإحصائية، ولكن الآلية لم يكن من السهل فهمها. كان هناك نظام معين، ولكن أيضا لانظام، إنها المقولة الشائعة فى هذا المجال، داخل الهيولية".

تقليدياً، يجرى التفكير فى الارتجاف البطيئ فى اتجاهين، الكلاسيكى القديم يرى أن الإشارات الثانوية المحددة للإيقاع تأتي من مراكز شاذة داخل عضلة القلب ذاته، متعارضة مع النبضات الأصلية. وقد أيد باحثو مكجريل بدرجة ما هذه الفكرة، حين بينوا أن نبضات داخل أنسجة القلب تتعارض مع النبضات الآتية من مصدر خارجي، ولكن السبب فى نشأة هذه المراكز فى المقام الأول كان أمراً عصياً على الفهم.

أما الاتجاه الثانى فلم يركز على نشأة النبضات، بل على طريقة انتقالها خلال القلب، وهو الاتجاه الذى اعتنقه باحثو هارفارد. لقد وجدوا أن الشذوذ فى الموجة، حين تدور فى حلقة مغلقة، يمكن أن يسبب "إعادة للدخول" ينتج عنه أن تقوم بعض الأجزاء فى النبض قبل أوانها، مانعة القلب من فترة التراخى المطلوبة لتنظيم الضخ.

وبالتركيز على طرق الديناميكا اللاخطية، تمكن كلا الفريقين من إدراك أن تغييراً طفيفاً فى أحد العوامل، ربما تغير فى التوقيت أو القابلية للتوصيل، يمكن أن يخرج نظاماً مستقراً ليتصرف بصورة أخرى. كما وجدوا أيضاً أساساً مشتركاً لدراسة مشاكل القلب بصورة شاملة، وربط صور من الاضطرابات كان يُظن سابقاً ألا ترتبط بينها. وبالإضافة لذلك، فقد كان وينفرى يظن أن كلا الفريقين، بالرغم من اختلاف المنهج، على حق. فمنهجه الطبولوجى يفترض أن الفكرتين هما فى الواقع فكرة واحد.

يقول وينفرى: "إن الظواهر الديناميكية تثير بصفة عامة صوراً متعددة من الإلهام، والقلب ليس استثناء من ذلك، "كان أطباء القلب يأملون أن تؤدي الأبحاث إلى طرق علمية للتعرف على أولئك المعرضين للأزمات القلبية، وتصميم أجهزة أفضل والوصول لعقاقير أكثر فعالية. وكان وينفرى يأمل أن تؤدي المنظور الرياضى الشامل لهذه المشاكل إلى تدعيم مجال لايزال فى طور الظهور فى الولايات المتحدة، البيولوجيا النظرية.



يتحدث بعض الأطباء اليوم عن "الأمراض الديناميكية dynamical diseases"؛ أى أمراض اختلال النظم والانهيار فى التوافق والتحكم. فالنظم المتذبذبة طبيعيا، تتوقف عن الذبذبة بصورة شاذة، وتلك التى من طبيعتها الثبات، تدخل فى حالة من الذبذبة. تتضمن هذه الاعراض اضطرابات التنفس، والتى يمكن أن تسبب الوفيات عند الأطفال. كما قد يحدث اضطراب فى نظام الدم، ينتج نوعا من أنواع اللوكيميا، واختلال فى نسبة الأجسام البيضاء والحمراء. ويعتقد بعض الأطباء أن الشيزوفرانيا، وبعض صور الاكتئاب، ربما تكون لنفس السبب.

ولكن الأطباء نظروا للهولوية أيضا كمظهر للصحة. فمن المعروف منذ زمن أن التغذية الخلفية تقوم بدور إيجابى فى استقرار نظم التحكم. فببساطة، تجد أن النظم الخطية حين تدفع فى اتجاه ما، تظل مستقر عليه. أما النظم اللاخطية، فحين تتلقى دفعة كهذه، تميل للعودة إلى وضعها الأصلي. وقد واجه كرسنيان هايجنز Christian Huygens، العالم الفيزيائى الهولندي، الذى اخترع البندول فى القرن السابع عشر وكذا علم الديناميكي الكلاسيكي، على مثال عظيم لهذا النوع من التحكم، فقد لاحظ ذات يوم أن مجموعة من البندولات قد أخذت تتحرك فى تزامن دقيق، وكان يعلم أنها لا يمكن عمليا أن تصل لهذه الدرجة من التزامن، وليس فى مبادئ الرياضيات ما يفسر ذلك. وقد استنبط هايجنز، وكان محقا، أنها متوافقة عن طريق الاهتزازات التى تنتقل عبر الحائط الخشبي. هذه الظاهرة، والتى بها تتحكم ذبذبة فى أخرى فتجبرها على اتباع خطواتها، يسمى "تثبيت النسق mode locking" وهى الخصيصة التى تفسر استمرار مواجهة القمر للأرض بوجه واحد، وكذا ميل الأقمار الصناعية إلى اللف (الدوران حول نفسها) عددا من المرات يمثل نسبة من عدد صحيح من مسارها (دورانها حول الأرض)، كأن تكون ١:١ أو ١:٢ أو ٢:١ وهكذا، فكلما اقتربت سرعة اللف من عدد صحيح من سرعة المسار، حدث تثبيت لسرعة اللف عند قيمة العدد الصحيح. وفى تكنولوجيا الإلكترونيات، يحدث تثبيت للنسق بين تردد دائرة الاستقبال والموجات المستقبلية، حين يوجد اختلاف طفيف بين الترددين. وتمكن ظاهرة تثبيت النسق مجموعة من الأشياء المهتزة، بما فيها الأشياء البيولوجية، كخلايا القلب والخلايا العصبية، من أن تعمل فى تزامن تام.

مع هذه الظاهرة يثور التساؤل حول قضية الرسوخ، لأى مدى يمكن لنظام أن يتحمل الصدمات، وعلى نفس الدرجة من الأهمية للنظم البيولوجية موضوع المرونة، إلى أى مدى يمكن للنظام أن يعمل على ترددات متغيرة فالتثبيت على نسق معين يمكن

ان يمنع النظام من تكييف نفسه مع تغير الظروف. فالكائنات يجب أن تواكب التغيرات التي تحدث في بيئتها بصورة فجائية وسريعة. فلا يمكن أن يقيد الجهاز النفسى عند نسق ثابت، ويسرى الأمر على بقية الأجهزة الأكثر دقة. وقد اقترح بعض الباحثين، منهم آرى جولدبرجر Ary Goldberger من كلية طب جامعة هارفارد، أن يكون النظام الديناميكي السليم مميزاً بهيكل فراكتلي، مثل تفرع الأنابيب الهوائية في الجهاز التنفسي وألياف التوصيل في القلب، بحيث يتيح العمل عند مدى واسع من الإيقاعات. وقد لاحظ جولدبرجر، مستعيداً آراء روبرت شو، أن "العمليات الفركتلية المصحوبة بطيف واسع من تعدد المقاييس غنية بالمعلومات. بينما الحالات الترددية في المقابل تعكس طيفاً ضيقاً، فهي محددة بتكررات مقبضة، عارية عن المعلومات." وقد اقترح مع بعض الباحثين أن معالجة هذه الاضطرابات قد تعتمد على توسيع مجال النظام، أى قابليته العمل على مدى واسع من الترددات دون الوقوع في قبضة تثبيت النسق.

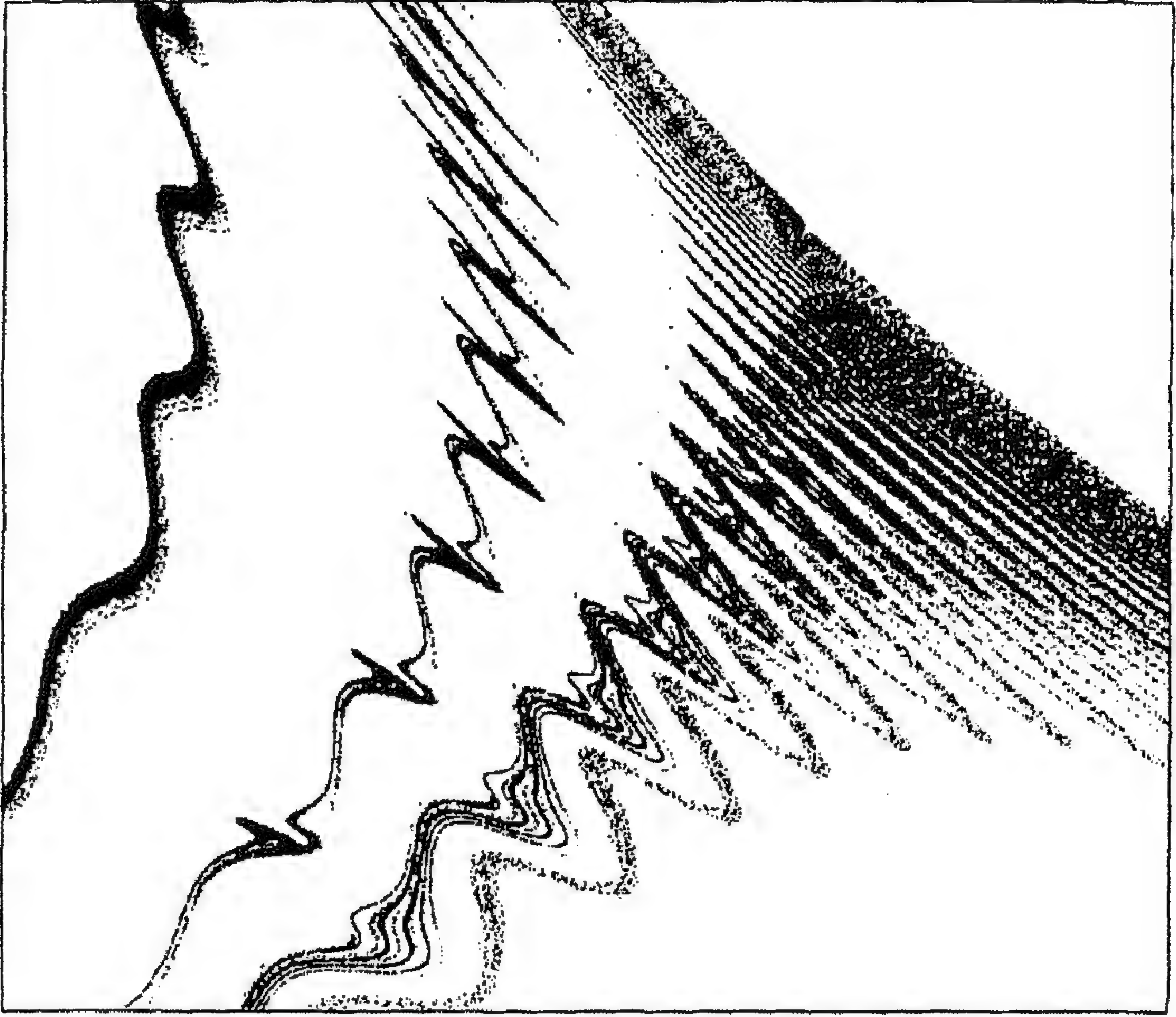
وقد توسّع أرنولد ماندل Arnold Mandell، طبيب وعالم في النظم الديناميكية، في دور الهيولية في الطب، فهو قد تحول إلى دراسة الهيولية عام ١٩٧٧، حين وجد "تصرفات غريبة" في بعض أنزيمات المخ لا يمكن تبريرها إلا عن طريق نوع حديث من رياضيات اللاخطية. وقد شجع على دراسة البروتينات كنظم ديناميكية، بدلاً من الاكتفاء بدراسة أشكالها الاستاتيكية.

وهو يرى أن الأبحاث الجديدة في الهيولية يجب أن يكون لها دور في علاج الحالات العصبية، واعتبار محاولة علاج كافة الحالات، من القلق إلى الأرق إلى الشيزوفرانيا، عن طريق العقاقير فقط هو اتجاه فاشل، فالنادر من المرضى هم من تم شفاؤهم بهذا الأسلوب. إن التحكم في أعنف الأمراض العصبية بهذا الأسلوب أمر ممكن، ولكن، ماذا على المدى الطويل؟ وقد بين لزملائه بالأدلة القاطعة أن بعضاً من هذه العقاقير تزيد المرض سوءاً، وأن بعضاً منها محدود النجاح.

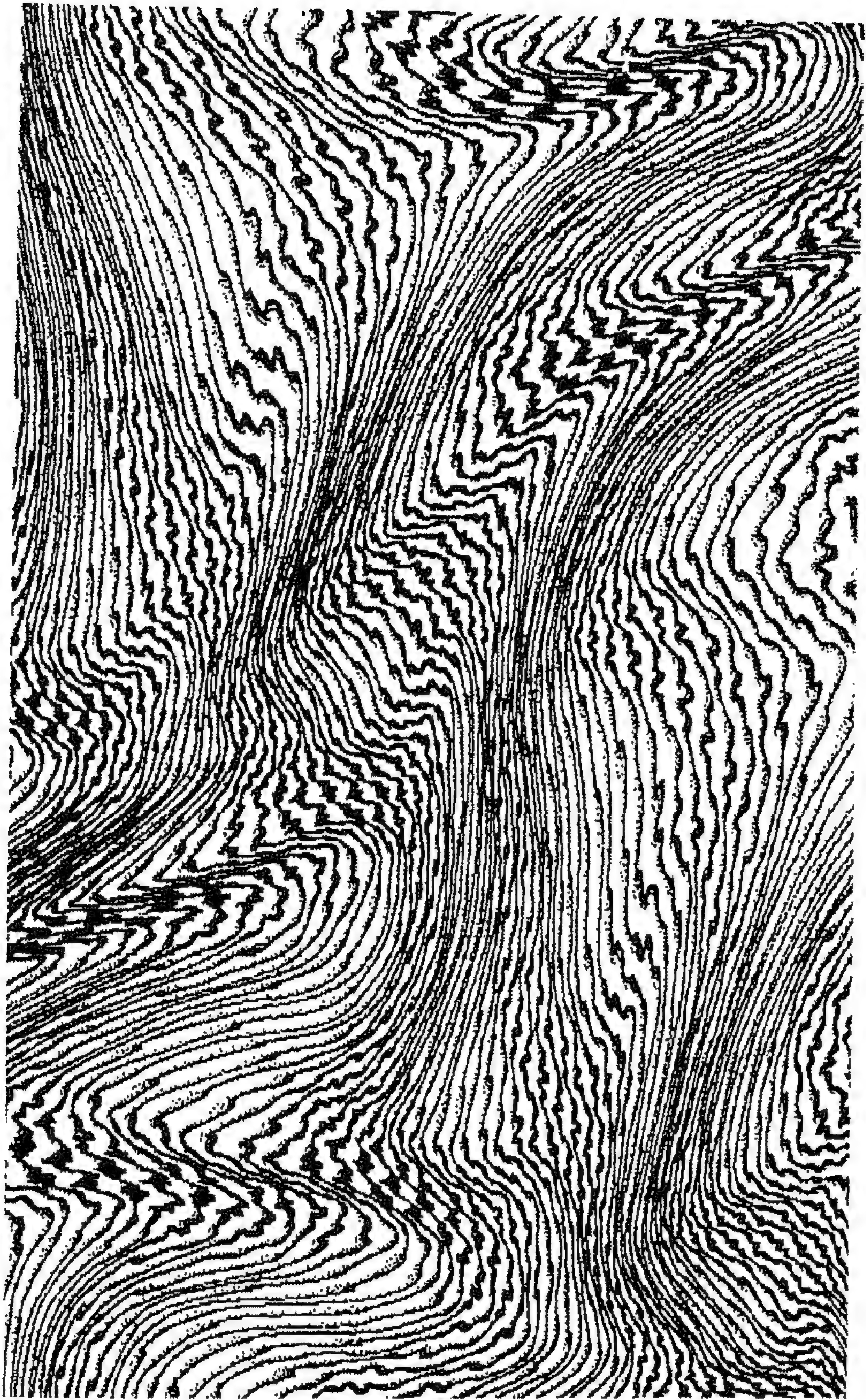
فبالنسبة له، كان يرى أن المسألة تكمن في المفاهيم، فالطرق التقليدية خطية تجزئية، خطها الفكري هو: جين — بيتيد — أنزيم — مرسل عصبي — تصرف — عرض مرضى — عقار. هذا الخط الفكري يحكم كافة الأبحاث وصور العلاج في الطب العقلي حتى أن المخ ذاته ينظر إليه كلوحة توصيلات كهربائية. ولا يملك أى إنسان على دراية بالديناميكا اللاخطية إلا أن يعلّق: "يا للسذاجة!" وقد أخذ يحث زملاءه على فهم التدفّقات الهندسية التي تكمن وراء النظم المعقدة كالمخ.

وقد اتجه علماء آخرون إلى تطبيق مفاهيم الهيولية على موضوع الذكاء الاصطناعي. فديناميكية النظم تغرى أولئك الذين يبحثون عن طريقة لنمذجة الرموز والذاكرة فالفيزيائي الذي ينظر للأفكار على أنها مناطق ذات حدود غير واضحة المعالم، منفصلة ولكن متداخلة، تتجاذب كمثّل المغناطيسات ولكن تسمح بالتباعد، سوف يلجأ بالتأكيد إلى فضاء الطور وما به من "أحواض basins للتجاذب"¹¹. هذه النماذج يبدو أن لها الخصائص المطلوبة، نقاط من الاتزان مختلطة بعدم الاتزان، مناطق من حدود متبادلة، يقدم هيكلها الفراكتلى هذه الخاصية من المرجعية الذاتية اللانهائية التى يبدو أنها محور مقدرة المخ على الازدهار بالأفكار والقرارات والعواطف، وكل ما يدخل فى صرح الوعي. فبالهيولية أو بدونها، لا يمكن لعلماء الإدراك أن ينمذجوا المخ كشيء استاتيكي. إنهم يدركون تدرج المقاييس، من الخلية العصبية فصاعداً، والتي تعطى تبادلاً بين ما هو على مقياس مرئى وما هو على مقياس متناه فى الصغر، والذي يميز اضطرابات السوائل والعمليات الديناميكية المعقدة الأخرى.

الأنماط تخرج من بين ما ليس له شكل محدد، هذه هى الصفة الجمالية للبيولوجيا وسحرها الأول، فالحياة تمتص النظام من بحر لانظام به. وقبل عصر الهيولية لم يكن هناك رياضة ولافيزياء لديها من الوسائل ما يمكنها من أن تقوم بتحليل اللانظام فى وحدات الحياة الأساسية، والآن، أصبحت هذه الوسائل متاحة.



شكل ١٠-٢ الهارمونية الهيولية Chaotic harminies . تنتج التفاعلات بين الإيقاعات، كترددات الراديو أو مسارات الكواكب، صورة من الهيولية الفراغية. الصورة في أسفل وفي الصفحة المقابلة هي صور حاسوبية لبعض "الجاذبات" التي يمكن أن تنتج حينما تتفاعل ثلاثة إيقاعات معا.





شكل ١٠-٣ التدفُّقات الهَيُولِيَّة:
يتسبب قضيب جذب خلال سائل
لزج في خلق شكل متموج بسيط،
ما جذب عدة مرات، تولدت أشكال
أكثر تعقيداً.



- i حالة يعرفها من عايش الانتقال بين مصر وأحد بلدان القارة الأمريكية أو الشرق الأقصى، حيث يظل لعدة أيام غير قادر على التأقلم مع التغير المفاجئ في التوقيت، ويطلق عليها "jet lag"، ويقصد به التأثير الناتج عن ركوب الطائرات النفاثة العابرة للقارات. المترجم.
- ii معجل الجسيمات في المفاعلات الذرية. المترجم.
- iii يُراجع ما قيل حول عدم قطعية الحدود بين مناطق الجاذبات في الفصل الثامن. المترجم.

الهيولية وما بعدها

في مطلع الستينيات من القرن العشرين، كان لورنتز يفكر في الطقس، وهينون في النجوم، وماي في توازن الطبيعة. وكان ماندلبروت رياضياً مجهولاً في مركز أبحاث آي بي إم، وفايجنباوم لم يتخرج بعد، وفارمر صيبياً يلهو في نيو مكسيكو.

كان أغلب العلماء إلى ذلك الحين يشتركون في معتقدات معينة حول التعقد تُؤخذ كقضايا مسلم بها، حتى ولو لم تُصاغ في كلمات أو توضع موضع الاختبار. لقد آن الأوان أخيراً لمراجعتها وتمحيصها.

● **النظم البسيطة** تعمل بطرق بسيطة. إن أداة ميكانيكية بدائية كالبن دول، أو دائرة كهربية بسيطة كمذبذب جهاز للاتصالات، أو تصوراً لتعداد مثالي لسمك في بركة- بقدر ما يمكن لنظم كهذه أن تخضع لقوانين بسيطة تحديدية ومنضبطة تماماً، فإن تصرفها على المدى البعيد يكون قابلاً تماماً للتنبؤ.

● **والنظم المعقدة** تعني أسباباً معقدة، جهاز ميكانيكي معقد، أو دائرة لجهاز كهربى متقدّم، أو تعداد جنس من الكائنات في الأحراش، أو تدفق لتيار متلاطم، أو عضو في جهاز بيولوجي، أو جسيم في إشعاع، أو عاصفة جوية، أو اقتصاد لدولة- مثل ذلك من نظم لا تتفك عن التغير، فهي بعيدة عن الاستقرار، وغير قابلة للتنبؤ أو للتحكم، إما لأنها تحكم بعوامل متعددة لا رابط بينها أو لأنها تتأثر بمؤثرات خارجية عشوائية.

● **والنظم المختلفة** تتصرف بطرق مختلفة، فالعالم البيولوجي الذي ينكب لسنوات على دراسة كيمياء العصبية في جسم الانسان، ومهندس الطيران الذي يستخدم الأنفاق الهوائية لحل مشكلة في الديناميكا الهوائية، وعالم الاقتصاد الذي يحلل سيكولوجية قرارات الشراء- علماء كهؤلاء يعلمون أن العوامل التي تتحكم في مجالاتهم مختلفة كل الاختلاف، فيظنون بداهة أن نظمهم المعقدة لابد أن تختلف فيما بينها كل الاختلاف.

والآن، تغيرت هذه المفاهيم كلياً. فعلى مدى عشرين عاماً وضع علماء الفيزياء والرياضيات والبيولوجيا والفلك مجموعة مخالفة تماماً من الأفكار: النظم البسيطة قد تؤدي إلى تصرفات معقدة، والنظم قد تنتج عن أسباب بسيطة، والأهم من هذا كله، إن قوانين النظم المعقدة قد تنتج عن أسباب بسيطة، الأهم من هذا كله، إن قوانين النظم المعقدة قوانين عامة، لا اعتبار فيها بخصوصيات المجال الذي تعمل فيه.

فبالنسبة للغالب من العلماء التطبيقيين، سواء الفيزيائيين أو الأطباء العصائبيين أو حتى الرياضيين فهم سائرون على دربهم المعتاد، ولكنهم أصبحوا على وعى بشيء يدعى الهولوية، وأن بعض الظواهر المعقدة قد تم تفسيرها، وأن ظواهر أخرى تحتاج إلى تفاسير جديدة. فعالم يدرس التفاعلات الكيميائية في مختبر، أو يتقصى تعداد حشرة في حقل تجارب، أو يضع نموذجاً لدرجة حرارة المحيط، لا يمكنه أن يظل على انفعاله القديم لما يحدث من تذبذبات فجائية، أو أن يتجاهلها. ويعنى هذا لدى البعض الدخول في المشاكل. فهم يعلمون أن الاموال قد خصصت للدراسة في هذا المجال ذي المسحة الرياضية، ويتزايد إدراكهم بأن الهولوية تقدم وسيلة حديثة للتعامل مع البيانات القديمة، والتي نسيت في الأدراج لكونها قد اعتبرت شاذة. كما يتزايد إدراكهم بعدم جدوى دراسة الأمور عن طريق تجزئتها. فالهولوية تعنى نهاية الاتجاه نحو البرامج العلمية الشمولية.

عدم الفهم، المقاومة، الغضب ثم القبول، لم ينج أحد من رواد الهولوية من التعرض لهذه المشاعر. يذكر جوزيف فورد محاضرة له، بين فيها التصرفات الهولوية الكامنة في إحدى المعادلات، وكيف تقاقر أغلب الحضور استنكاراً، من منطلق أنه اختلاق لم يسمع به من قبل، يقول عن ذلك: إن الذي لم أفهمه هو الروح العدائية التي سادت.

جالسا في استرخاء في مكتبه بأطلانطا، كان فورد يعبّ الصودا من قدح ضخمة مكتوب عليه "Chaos" يتذكر مساعده الأصغر عمرا رونالد فوكس حين اشترى حاسوباً من طراز أبل، في وقت لم يكن باحث محترم يعبّ بشراء مثل هذه الأشياء لأبحاثه. كان قد سمع أن فايجنباوم قد اكتشف عدة قوانين عامة تصف تصرفات الدوال المحتوية على تغذية خلفية، فقرر أن يكتب برنامجاً يرى به مثل هذا التصرف على شاشة جهازه. وراه زاهى الألوان أمام عينيه؛ التفرع الثنائي، خطوط مستقرة تنقسم إلى قسمين، ثم كل قسم إلى قسمين، ظهور الهولوية بذاتها، ثم في ثناياها، الانتظام الهندسى المدهش. هكذا ساهم التعليم الذاتى فى إقناعه وآخرين بما لم تستطع المقالات المكتوبة فعله.

لعب بعض العلماء بمثل هذه البرامج ثم توقفوا، بينما لم يستطع آخرون مقاومة التغير. كان فوكس من الواعين بقصور التحليل الخطي، مدركاً لما يحدث حين تُنحَى الظواهر اللاخطية جانبا. إن لسان حال عالم يقوم بذلك هو إنها مشكلة تتطلب منى الرجوع إلى مراجع عن الدوال الخاصة، وهو آخر شئ أود أن أفعله، ولست بالذى يبحث عن آلة تقوم بهذا العمل عني، فأنا أرفع من ذلك".

يقول فوكس: "إن الصورة العامة للاخطية قد جذبت انتباه الناس، ببطء فى البداية، ثم ازدادت السرعة. وكل إنسان فكر فى الأمر، جنى ثماره. انظر الآن لمشكلة تعرضت لها من قبل، بصرف النظر عن المجال التى تعمل به، ستجد أنك عند نقطة ما تركت المشكلة بسبب اللاخطية. الآن يمكنك الرجوع إليها، إذ تعلمت كيف تواجهها".

ويقول فورد: "إذا كان لمجال أن ينمو، فإنما يكون ذلك لأن جمهرة من الناس رأوا فى ذلك فائدة جمة لهم".

ومع ذلك، فليس الجميع متفقين على مصطلح "chaos" فى حد ذاته، فهو يقصر عن إظهار مضمون هذا العلم الجديد، والذى يتمثل فى رأى البعض منهم فى الأوصاف التالية:

* فيليب هولز Philip Holmes، رياضى وشاعر أبيض اللحية من كورنل: المسارات الجاذبة المعقدة والدورية للنظم الديناميكية (قليلة الأبعاد عادة)

* هاو باى-لين Hao Bai-Lin الفيزيائى الصينى الذى جمع قدراً مهولاً من مقالات الهيولية فى كتاب مرجعى: نوع من النظام بدون دورية. و: مجال سريع التطور من الأبحاث تشاركت فيه الرياضيات والفيزياء وديناميكا الموائع والعلوم البيئية وكثير من المجالات العلمية الأخرى. و: طراز من ظواهر طبيعية عامة تم التعرف عليها حديثاً.

* هـ. بروس ستيوارت H.Bruce Stewart رياضى تطبيقي من معمل بروكهافن القومى فى لونغ آيلاند: تصرف تكرارى عشوائى ظاهرياً لنظم بسيطة تحديدية.

* رودريك ف. جينسن Roderick V. Jensen من جامعة ييل، فيزيائى نظري يبحث فى احتمال الهيولية الكمية quantum chaos: التصرف غير المنتظم وغير القابل للتنبؤ لنظم ديناميكية تحديدية غير خطية.

* جيمس كرتشفيلد من جماعة سانتا كروز: ديناميكية ذات إنتروبيا متريية metric entropy موجبة ولكن محدودة finite، والترجمة الرياضية لذلك: تصرف

ينتج المعلومات، ويكبر من الدرجات الطفيفة من عدم التأكد، ولكن ليس غير قابل للتنبؤ كلية.

* أما بالنسبة لفورد، الذي يعتبر نفسه حواريا للهيولية: ديناميكية تحررت أخيراً من أغلال النظام والدورية.. نظم تحررت لتستكشف على حريتها كافة احتمالاتها الديناميكية.. ثراء مدهش من الخيارات والفرص.

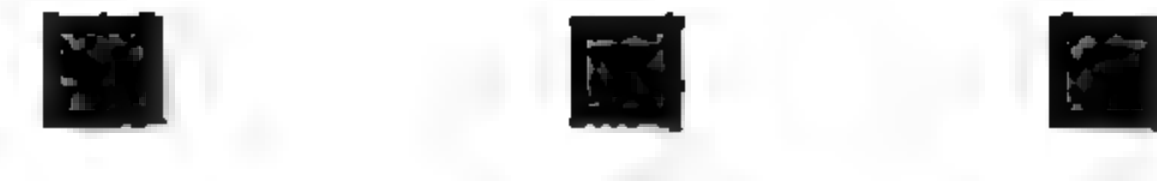
وقد اعتبر جون هبارد وهو ينقص الدوال التكرارية وأشكال ماندلبروت المتشعبة مصطلح chaos اسماً فقير التعبير، لكونه يعنى ضمناً العشوائية. ففي رأيه أن الرسالة الجوهرية في الأمر أن العمليات البسيطة في الطبيعة يمكن أن تنتج صروحاً هائلة من التعقد دون عشوائية. ففي اللاخطية والتغذية الخلفية يكمن الوسائل اللازمة لتكوين ثم فك التكوين لهياكل تصل من الثراء إلى درجة المخ البشري.

وبالنسبة لعلماء آخرين، مثل آرثر وينفري، الذي يكشف الطبولوجيا الشاملة للنظم البيولوجية، فالمصطلح ضيق، حيث يعنى ضمناً النظم البسيط، خرائط فاينباوم وحيدة البعد، وجاذبات رول الغربية ذات البعدين أو الثلاثة، أو الأبعاد الكسرية.

وبالنسبة لعلماء آخرين، مثل آرثر وينفري، الذي يستكشف الطبولوجيا الشاملة للنظم البيولوجية، فالمصطلح ضيق، حيث يعنى ضمناً النظم البسيطة، خرائط فاينباوم وحيدة البعد، وجاذبات رول الغربية ذات البعدين أو الثلاثة، أو الأبعاد الكسرية. فالهيولية قليلة الأبعاد في رأيه حالة خاصة، وكان اهتمامه منصباً على قوانين التعقد كثير الأبعاد، وكان مقتنعاً بوجود هذه القوانين فيبدو أن قدراً كبيراً من الكون خارج عن نطاق الهيولية قليلة الأبعاد.

حملت مجلة الطبيعة جدلاً دائراً حول ما إذا كان طقس الكرة الأرضية يتبع جاذبا غريباً. وقد بحث المحللون الاقتصاديون في تقلبات البورصة عن جاذب غريب مميز ولكن لم يعثروا على شيء من ذلك حتى الآن، وقد استفاد علماء الديناميكا من وسائل الهيولية لتحليل الاضطرابات تحليلًا وافياً. وحين كان ألبرت لبشابر جديداً في كلية شيكاغو، كان يجري أسلوبه التجريبي الرشيق لدراسة الاضطرابات، بصندوق يحوى الهليوم السائل أكبر كثيراً من خليته عام ١٩٧٧. هل تكتشف هذه التجارب، التي تطلق اضطراب السائل في الزمن والفراغ معاً، وجود جاذبات بسيطة؟ لا أحد يعلم حتى اليوم. يقول هيرمان: "لو أنك أخذتنا إلى نهر مضطرب، وأدليت به مجسماً وقلت: انظروا، هنا جاذب غريب، فسوف نخلع جميعاً قبعتنا لكي ننظر".

كانت الهيولية مجموعة من الأفكار أقنعت كل هؤلاء العلماء أن بينهم مشروعاً مشتركاً. فيزيائيون أو رياضيون أو بيولوجيون، اقتنعوا جميعاً أن النظم البسيطة التحديدية يمكن أن تولد تعقيداً، وأن النظم المستعصية على التحليل الرياضى التقليدى لفرط تعقدها تخضع لقوانين بسيطة، وأهمتهم، على اختلاف مجالاتهم العلمية، أن يفهموا التعقّد فى حد ذاته.



كتب جيمس لفلوك، واضع فرض الجايا: "لننظر مرة أخرى إلى قوانين الديناميكا الحرارية، إنها تبدو لأول وهلة وكأنها جحيم دانتي" ولكن..

إن القانون الثانى يزفُ نبأً سيئاً خرج من ثنايا العلم ليستقر بثبات فى الثقافة غير التخصصية، كل شئ ماله العشوائية. كل عملية تحويل للطاقة من صورة لأخرى يجب أن تتضمن مقدارا مفقودا يتسرب على صورة حرارة مشتتة، فالكفاءة التامة فى صورة تحويل الطاقة أمر مستحيل التحقيق، والكون يسير فى اتجاه واحد، فالإنتروبيا يجب أن تتزايد فيه وفى أى نظام منغلق على نفسه. ومهما كانت صياغته، فالقانون الثانى محكم لامجال للفكاك من قبضته. هذا صحيح فى نطاق الديناميكا الحرارية، ولكن له صدى أيضا فى مجالات أبعد ما تكون عن هذا المجال، فقد اعتُبر هو المسئول عن تحلل الحضارات، وانهيار النظم الاقتصادية، وتردى الاخلاق، وغير ذلك من ظواهر للتغير نحو التششت. هذا التجسيد المعنوى لقانون الثانى لم يعد يعتقد به اليوم، ففى عالمنا، حيث تزدهر الظواهر المعقدة، يجد الباحثون عن فهم أفضل لظواهر الطبيعة بغيتهم فى مفهوم الهيولية.

فحين ينحدر الكون بعد حين إلى الإنتروبيا القصوى، حيث التوازن الحرارى الكامل، سوف يتمكن بصورة ما من خلق هياكل مثيرة. فالعلماء المهتمون بطريقة عمل قوانين الديناميكا الحرارية يدركون مدى الحيرة أمام هذا السؤال: "كيف يمكن لتدفق غير هادف للطاقة أن تنتج حياة ووعيا فى الكون؟". وتعقيدا للموضوع بدرجة أكبر، نجد المفهوم الهلامى للإنتروبيا، حيث يكون تحديدها واضحا فى نطاق الديناميكا الحرارية، بمدلول الطاقة الحرارية ودرجات الحرارة، ولكنها كمعيار للعشوائية صعبة التعريف بدرجة مزعجة. لقد عانى الفيزيائيون ما فيه الكفاية لقياس درجة الانتظام فى الماء، وهو يتبلور إلى ثلج، بينما الطاقة تتشتت منه خلال ذلك. ولكن حين نأتى إلى خلق الأحماض الأمينية، أو الكائنات المجهرية، أو التكاثر الذاتى فى النبات أو الحيوان، أو

نظام معلوماتي معقد كالمخ، فإن الإنتروبيا الديناميكا الحرارية تفشل فشلاً ذريعاً في وضع معيار لدرجة التحول من أشياء لأشكال لها إلى ما هو ذو شكل محدد. بالتأكيد هذه الجزر المتطورة إلى النظام يجب أن تخضع للقانون الثاني، أما القوانين الأساسية، القوانين المتعلقة بالخلق، فهي من مكان آخر.

تصنع الطبيعة الأنماط، منها ما هو منتظم في الفراغ ولكن غير منتظم مع الزمن، ومنها ما هو على العكس، منتظم مع الزمن وغير منتظم في الفراغ. ومن الأنماط مع هو فراكتلي، يحتوى على تماثل ذاتي على تدرج مستويات المقاييس. ومنها ما يستقر على حالة ثبات، أو حالة من التذبذب الدوري. لقد أصبح تكون الأنماط قرعاً قائماً بذاته في الفيزياء وعلم المواد، يسمح للعلماء أن يضعوا نماذج لتجمع الجسيمات، ولتشبث الشحنات الكهربائية، ونمو البلورات في تكون الثلج وسبائك المعادن. تبدو الديناميكية أولية بدرجة كبيرة، أشكال تتغير في الفراغ وفي الزمن، ولكن اليوم فقط وجدت الوسائل لفهمها. إنه من حقد اليوم أن تسأل عالم الفيزياء: "لماذا تختلف أشكال كسف الثلج؟"

تتكون بلورات الثلج في وسط من هواء مضطرب، جامعة بين التماثل والهيولية، الجمال الكامن في شكل غير محدد الملامح. فحين يتجه الماء نحو التجمد، فإن البلورات تبرز نتوءات، وتنمو هذه النتوءات، وتكون حوافها غير مستقرة، وتتشعب منها نتوءات أخرى من الجوانب. وتخضع كسف الثلج لقوانين رياضية على درجة مذهشة من الخفاء، ومن ثم فقد كان من المستحيل أن يتوقع حجم النتوءات أو سرعة نموها، أو إلى أي مدى يكون تفرعها وقد قامت أجيال من العلماء بوضع رسومات تخطيطية وتصانيف الأنماط المختلفة، صفائح وأعمدة اسطوانية، بلورات متضاعفة، إبر وتفرعات، وتعالج الأبحاث تكون البلورات كنوع من تصنيف المواد، حيث ليس أمامهم طريق أفضل.

ويعرف عن نمو مثل هذه النتوءات والتفرعات أنها مسألة على درجة عالية من اللاخطية، متعلقة بالحدود الحرة غير المستقرة، بمعنى أن النماذج يجب أن تتبع حدوداً معقدة متأرجحة وهي تتغير بصورة ديناميكية. وحين يكون التصلب من الخارج للداخل كما هو في حالة تجمد الماء في طبق، تكون الحواف بصورة عامة مستقرة وناعمة، وتكون السرعة محكومة بالمقدرة على التخلص من الحرارة. ولكن حين تتجمد البلورات بدءاً من بذرة أولية في اتجاه الخارج، كما هو الحال في تكون كسف الثلج، حيث تقتنص قطرات الماء وهي متساقطة خلال الماء المشبع بالرطوبة، تكون العملية غير

مستقرة. فأى بروز يتفوق بقدر ضئيل يكون فى ميزة لاقتناص قدر أكبر من القطيرات، ويكون التفرع فى اتجاهه، وكذلك تتوالى التفرعات.

كان من نواحي الصعوبة تحديد أى نوع من القوى له أثر فعال، وأيها يمكن إهماله دون خطأ يذكر. وقد أدرك العلماء منذ زمن أن العامل الجوهرى هو القدرة على تشتيت الحرارة خلال تجمد الماء. ولكن الفيزيائيين العاملين فى مجال تشتت الحرارة كانوا عاجزين تماماً عن تفسير ما يراه الباحثون تحت مجاهرهم من أنماط مختلفة. ومؤخراً أدخل العلماء عاملاً آخر، التوتر السطحي. إن القلب من النماذج الحديثة لتكون كسف الثلج هى الهولوية، التوازن الدقيق بين قوى التوازن وقوى الإخلال به. تفاعل قوى بين قوى على مستوى الذرات وقوى على مستوى العالم الملموس.

تشتت الحرارة يسبب عدم الاتزان، والتوتر السطحي يسبب الاتزان، فجذب التوتر السطحي يجعل المواد تفضل الأسطح الملساء، مثل سطح فقاعة الصابون، بينما خشونة الأسطح تكلف طاقة، ويكون التوازن بين هذين الاتجاهين معتمداً على حجم البلورة. فبينما يعمل التشتت على مقياس كبير، يعمل التوتر السطحي على المستوى المجهرى.

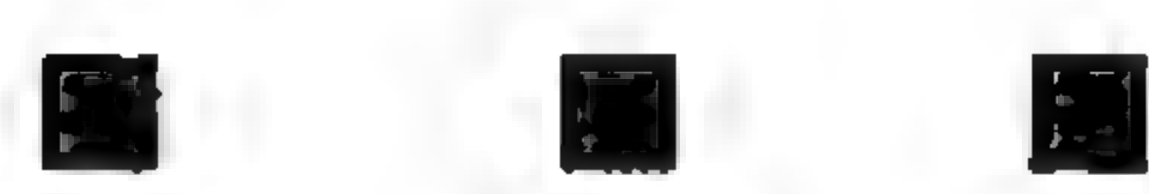
وتقليدياً، كانت قوى التوتر السطحي يتم تجاهلها لصغرهما بالنسبة للأغراض العملية. ليس الأمر كذلك، فقد بينت أدق المقاييس أنها أيضاً مهمة بدرجة خطيرة، حيث يكون تأثير السطح حساساً للغاية للهيكل الجزئى للمادة المتجمدة. وفى حالة الثلج، فإن التماثل الطبيعى للجزيئات يؤدي إلى تفضيل كامن للنمو فى ستة اتجاهات. ولدهشتهم البالغة، وجد العلماء أن خليط الاتزان وعدم الاتزان قد نجح فى تكبير هذا التفضيل الكامن، منتجا نظاماً للعمل شبه فراكتلى يصنع الكسف. لم تأت الرياضيات من علماء الطقس، بل من الفيزيائيين وعلماء المواد، والذين كان لهم اهتمامهم بالموضوع أيضاً. وفى المعادن يكون التماثل الجزيئى مختلفاً، وعلى ذلك تكون خصائص البلورات، والتي تعين على معرفة قوة المعدن. ولكن الرياضيات واحدة، فقوانين بناء الأنماط قوانين عامة.

إن حساسية الاعتماد على الظروف الابتدائية تفيد ليس فى الهدم بل فى البناء. فحين تتساقط كسفة إلى الأرض، بعد أن تكون معلقة فى الهواء ساعة أو أكثر عادة، فإن الاختيارات حول ظهور بروز فى أية لحظة يعتمد على عوامل مثل درجة الحرارة والرطوبة ووجود شوائب فى الجو، فالسنة بروزات لكسفة منفردة، منتشرة فى فراغ مليمتر واحد، تحس بنفس درجة الحرارة، ولأن قوانين النمو تحديدية للغاية، فإن التماثل يكون محافظاً عليه تقريباً. ولكن الاضطراب فى الجو يكون بحيث أن كسفتين

متجاورتين سوف يسلكان مسارات مختلفة تماماً. وتسجلّ الكسف المختلفة كل ما صادفته من ظروف متغيرة، فتكون الاحتمالات المختلفة لانهائية أيضاً.

وتكون كسف الثلج ظاهرة غير توازنية، كما يحب الفيزيائيون القول. فهي نتاج لعدم التوازن في سريان الطاقة من جزء من الطبيعة إلى جزء آخر. هذا السريان يحول السطح الخارجى إلى بروز، والبروز إلى تفرعات، والتفرعات إلى هيكل لم تره عين من قبل. وكما اكتشف العلماء مثل ذلك اللاتوازن الذى يخضع للقوانين العامة للهيولية، فإنهم نجحوا فى تطبيق نفس الطرق إلى مجموعة كبيرة من المسائل الفيزيائية والكيميائية. ويتوقع أن تكون البيولوجيا هو الموضوع القادم. ففي خلفية أذهانهم وهم يتطلعون على شاشات الحاسوب إلى التفرعات وهى تنمو، الطحالب وجدران الخلايا والكائنات الحية تتبرعم وتنقسم.

من التعقد على مستوى الجزيئات المجهرية إلى مستوى الحياة العامة، هناك طرق عديدة تبدو مفتوحة. ففي الرياضيات الفيزيائية ازدهرت نظرية التفرع الثنائى لفايكنباوم ورفاقه، وفى الأبحاث التجريدية للفيزياء النظرية يطرق العلماء موضوعات أخرى، مثل ذلك السؤال الذى لا يستقر حول الهيولية الكمية quantum chaos، هل تسمح ميكانيكا الكم بالظواهر الهيولية التى تسمح بها الميكانيكا الكلاسيكية. فى دراسة السوائل المتدفقة بنى ليبشابر صندوقه الدقيق للهليوم السائل، بينما كان بيير هوهنبرج Pier Hohenberg وجينتر آلرز Gunter Ahlers يدرسون الموجات القديمة لتيارات الحمل. وفى الفلك استخدم العلماء المتخصصون فى الهيولية اختلال التوازن الجاذبى لشرح وجود الكويكبات، ويستخدم العلماء فيزياء النظم الديناميكية لدراسة الجهاز المناعى للإنسان، بما فيه من بلايين الجزيئات، وما له من مقدرة على التعلم والتذكر والتعرف على الأنماط، وهم فى نفس الوقت يدرسون التطور، أملين أن يجدوا آليات عامة للتكيف. وأولئك الذين يضعون مثل هذه النماذج يرون سريعاً هياكل تنسخ نفسها، وتتصارع، وتتطور عن طريق الانتخاب الطبيعى.



ساعدت هذه الأفكار العلم فى مجموعة على التقدم. على أنه لا الفلسفة ولا البرهان ولا التجربة منها ما يدفع باحثاً للخروج عن خطه، مالم تثر حاجة ماسة لذلك. وقد حدث ذلك فى كل المجالات العلمية. ففي مجال البيئة، كان م. شافير M. Schaffer مثلاً لذلك.

كان شافر آخر تلاميذ روبرت مكارثر Robert MaArther، عميد هذا المجال في الخمسينات والستينات. وقد وضع مكارثر تصوراً للطبيعة مؤسساً بقوة على التوازن الطبيعي. كان نموذج مكنيا على افتراض أن التوازن يتحقق، وأن تعداد النباتات والحيوانات يظل قريباً منه. كان التوازن هو الخصيصة الركنية، فبه يتحقق أفضل توزيع للمصادر الغذائية، وأقل فقد لها، وأن الطبيعة، إذا ما تركت وشأنها، فسوف تحسن التصرف.

بعد عقدين، أدرك آخر تلاميذ مكارثر أن التصور البيئي المبني على مفهوم التوازن مكتوب عليه بالفشل. فهذه النماذج التقليدية مخدوعة في تحيزها للخطية. فالطبيعة أكثر تعقداً، وقد رأى بدلاً من ذلك، الهيولية آتية "تأخذ بالألباب، وتحمل شيئاً من تهديد، أشبه بزوينة تسبق العاصفة، وفي هذه الحالة عاصفة لخطية".

يستخدم شافر الجاذبات الغربية لاستكشاف الويائيات التي تلم بالأطفال في أمراض مثل الحصبة والجديري. لقد بحث عن البيانات في الولايات المتحدة وبريطانيا، ووضع النموذج الديناميكي، يماثل بندولا ذو حركة قسرية مخمدة. فالمرض ينتشر بسبب عودة الأطفال للمدارس، ويخمد عن طريق المقاومة الطبيعية. وقد تنبأ نموذجه بتصرفات مختلفة أشد الاختلاف لهذه الأوبئة. الجديري قد يتغير دورياً، بينما الحصبة هيولياً. والذي حدث أن البيانات حققت تماماً تنبؤ نموذج شافر. بالنسبة لعلماء الأوبئة التقليديين، كانت دورات انتشارها تبدو بلا تفسير، عشوائية ومشوشة. أما شافر، وبأسلوب فضاء الطور، بين أنها تخضع لجاذب غريب، ذي بعد كسري حوالي ٢.٥.

حسب شافر رقم ليابنوف ورسم خرائط بوانكاريه، ورغم هيولية الجاذب، فإن قدراً من التوقع أصبح ممكناً بسبب الطبيعة التحديدية للنموذج. فعلم من انتشار الحصبة يتلوها عام من انحسارها. وبعد عام من انتشار متوسط، لا يحدث سوى تغير طفيف، وعام من الانتشار المنخفض ينتج أكبر قدر من عدم القدرة على التنبؤ. كما تنبأ نموذج شافر الأثر المخمد لحملات التطعيم، وهو تنبؤ لم يكن ممكناً بالوسائل التقليدية، فالإحساس بأن الوباء لا يزال منتشرًا خلال حملة تطعيم يعطى إحساساً خاطئاً بفشلها.

على المستوى الجماعي والشخصي، تقدمت أفكار الهيولية في اتجاهات مختلفة ولأسباب مختلفة. بالنسبة لشافر، كما للكثيرين غيره، كان التحول عن العلم التقليدي إلى الهيولية غير متوقع. لقد كان هذا ما نادى به مائى فى حملته عام ١٩٧٥، وقد قرأ بحثه، ولكنه تجاهله. كان يظن أن الأفكار الرياضية غير مناسبة للمجال الذي يعمل به. وقد نصحه أحد زملائه أن يقرأ للورنز، ولكنه لم يعبأ بالنصيحة.

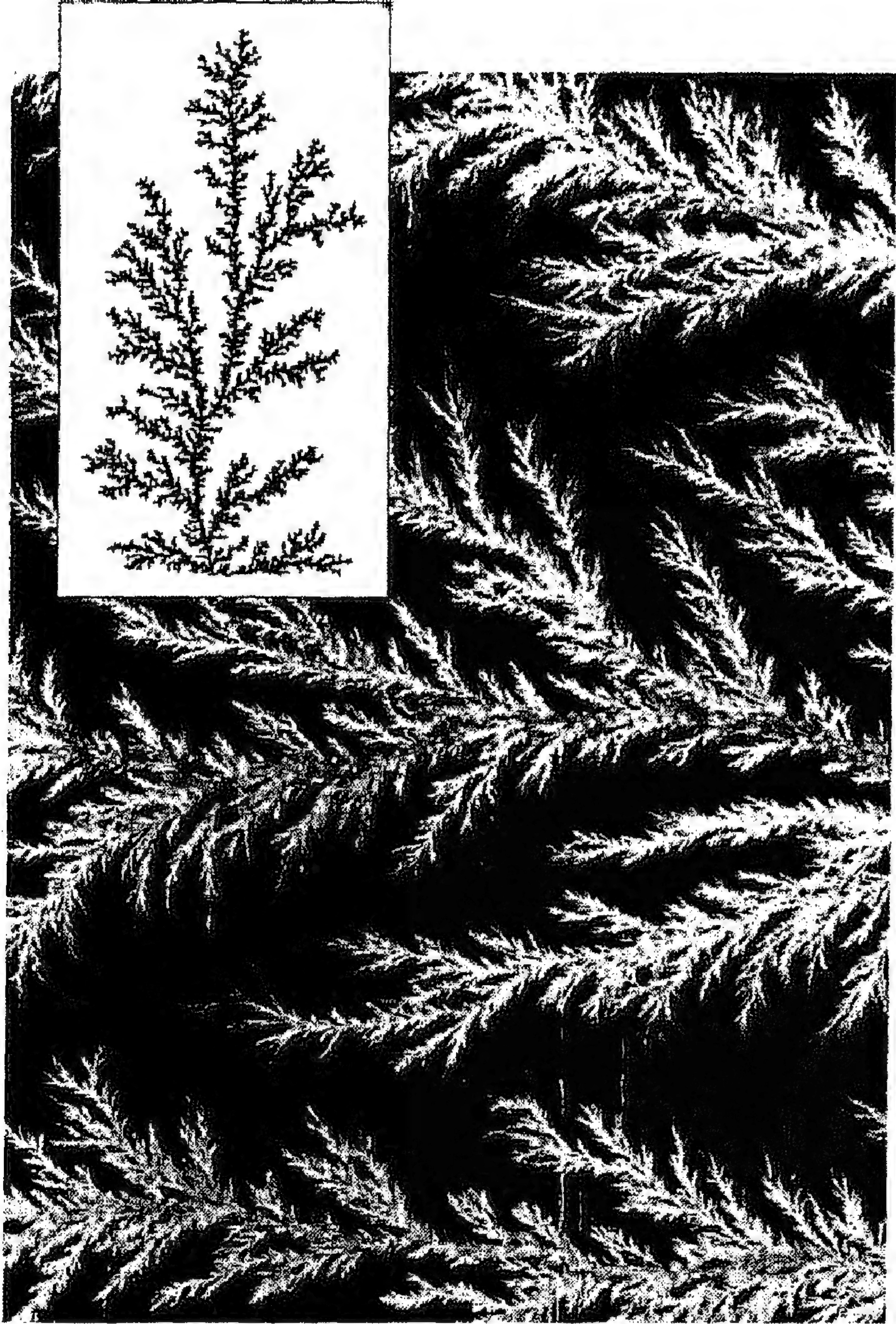
بعد عدة سنوات كان مع جمع من تلامذته في صحراء الأريزونا، يتتبعون أنواع الحشرات ويحللون النتائج رياضياً. وتمكن شافر من وضع نموذج يفسر التغيرات في أعدادها.

وفي عام ١٩٨٠ تأكد من أنه مخطئ تماماً. لقد انهار نموذجه، وتضاربت الآراء حول الأسباب، فمنهم من عزاها إلى تجاهل النمل، ومنهم من قال بأنه تغير الطقس غير المتوقع، وفكر شافر في إدخال مزيد من العوامل على نموذجه، ولكن الإحباط كان حليفه. بعد ذلك، تغير كل شيء.

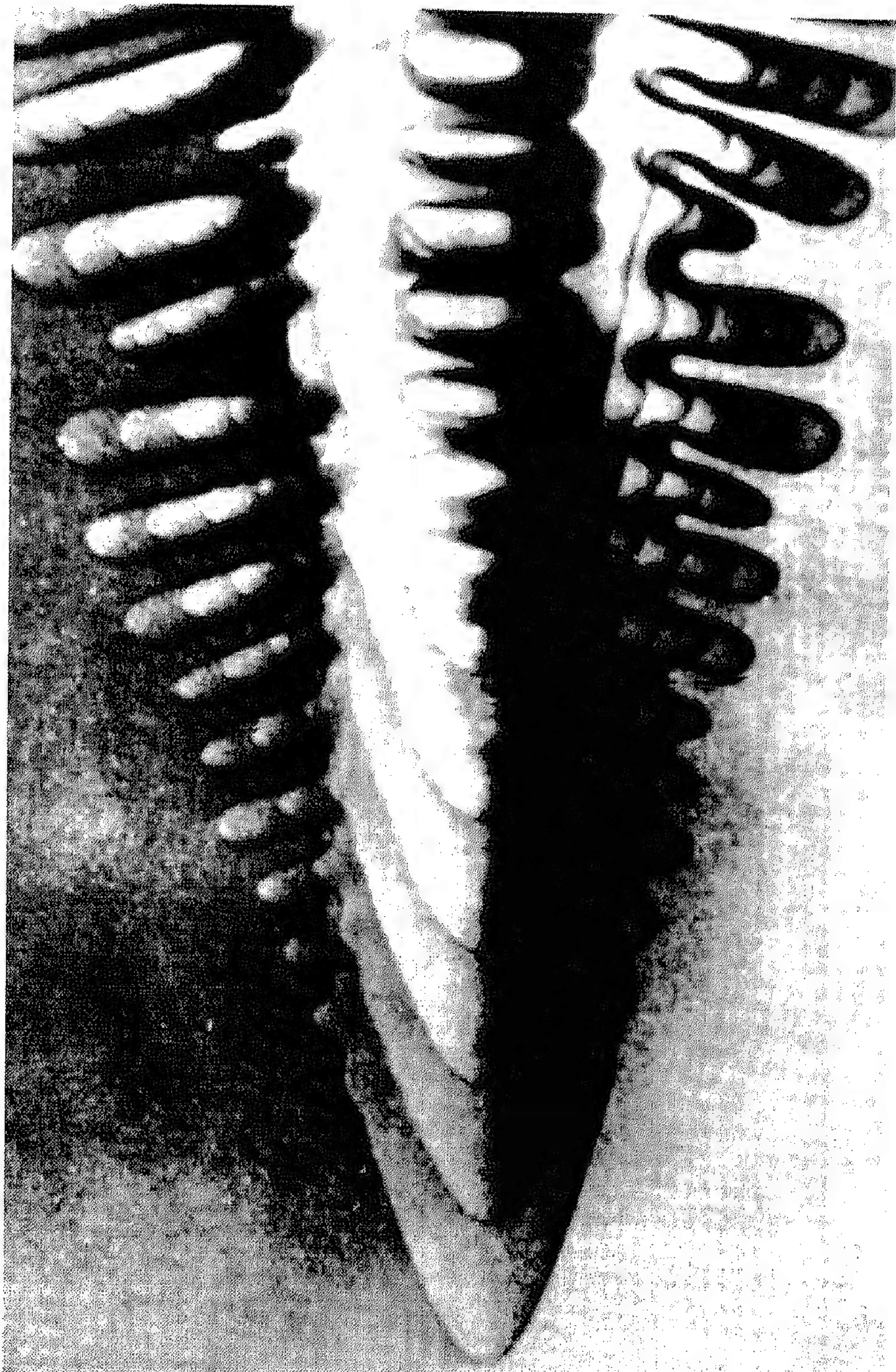
وقع تحت يديه بحث عن الهيولية في التفاعلات الكيميائية. وشعر أن الكاتب قد مرّ بنفس تجربته، استحالة مراقبة العشرات الأنواع من الحشرات. مع ذلك، فقد نجح صاحب البحث حين فشل هو. ولقد قرأ عن طريقة رسم فضاء الطور، ثم قرأ للورنز، ثم يورك، وآخرين. وقامت جامعة أريزونا بتنظيم سلسلة محاضرات تحت عنوان "النظام في الهيولية"، وجاء هاري سويني، وتحدث عن تجاربه، وحين رأى شافر شرائح لرسومات للجاذبات الغريبة، وصوت سويني يقول: "إنها بيانات حقيقية"، شعر بالقشعريرة تسرى في بدنه.

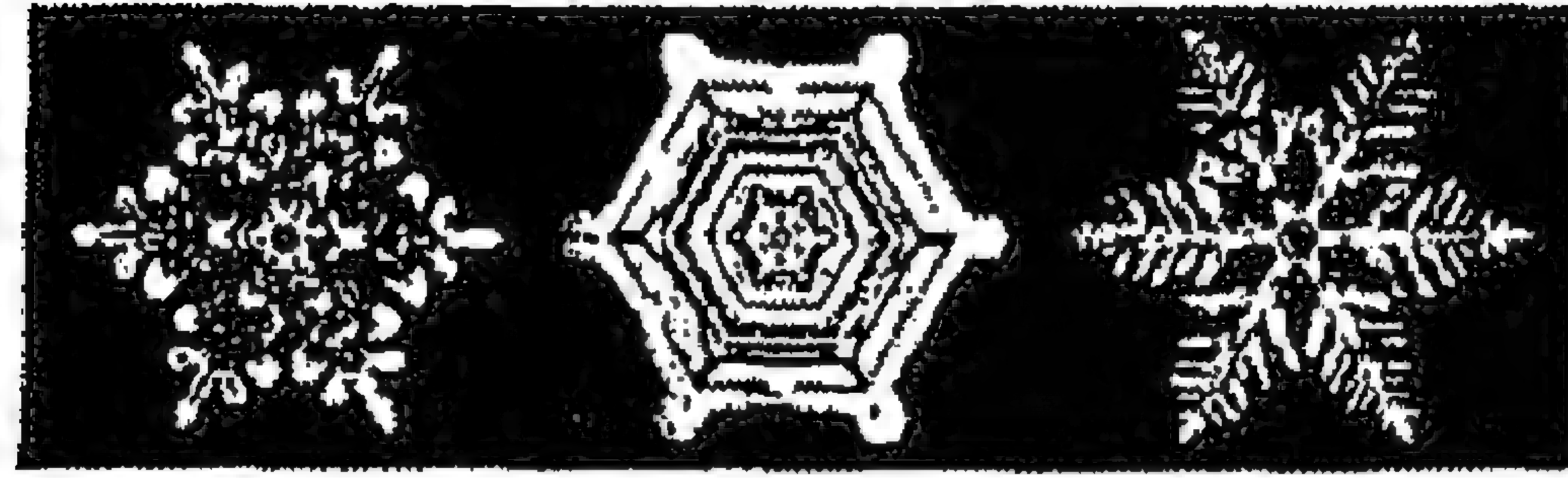
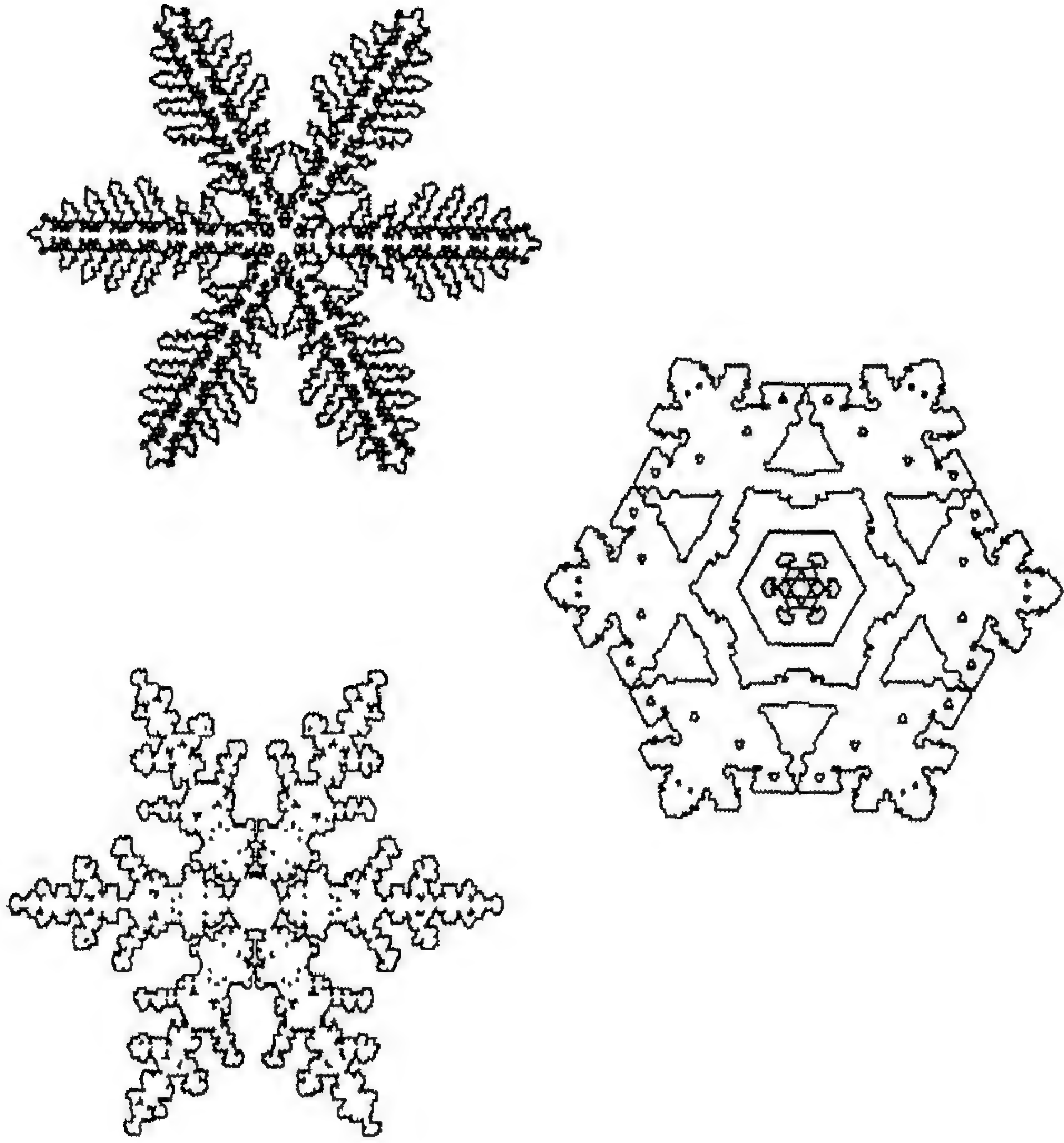
يقول شافر: "أحسست فجأة أن هذا الطريق أصبح قدرى". والتحق على الفور بعام دراسي.

هناك في أعالي الجبال، كان يعلم أن النمل يتغير مع الفصول، وأن النحل يتدافع في أزيز ديناميكي، وأن السحب تغطي صفحة السماء، وأنه لم يكن قادراً على الاستمرار في العمل بالأسلوب القديم.



شكل ١١-١ التفرع والتجمع: إن دراسة أنماط الحركة، والتي تعززها رياضيات الهولوية، تربط بين الصور الطبيعية المختلفة، كربط مسار الشحنات الكهربائية في حالات البرق والصواعق بالتجمعات العشوائية للجسيمات المتحركة (الصورة الصغرى).





شكل ١١-٢ التوازن بين الاستقرار وعدم الاستقرار. بينما يتبلور السائل، تظهر فيه بروزات نامية ذات حواف تصبح غير مستقرة، فترسل تفرعات جانبية (مبينة في صورة اليسرى متعددة اللقطات). تظهر المحاكيات الحاسوبية لعمليات الديناميكا الحرارية الدقيقة محاكاة لتكون الكسف الثلجية (الصور في الشكل الأيمن).

يبين هذا النقد بجلاء فساد المقابل العربى الذى يحمل معنى الفوضى، ومدى التوفيق بالنسبة للمصطلح العربى الذى اخترناه، فهو لا يحمل بالنسبة للقارئ العربى هذا المعنى الخاطى، فمصطلح الهيولية فى التراث يعنى المادة الأولى التى قيل بأن منها صُنِعَ الكون، ومن جهة أخرى فهو بهذا المعنى قريب من مفهومه العلمى الجديد كطريقة لتكون الأنظمة والأشكال فى الطبيعة، وما التوفيق إلا من عند الله- المترجم.

قاموس عربى - لاتينى

استقرار Stability: يوصف النظام بأنه مستقر stable إذا صمد أمام المؤثرات، بحيث يعود إلى وضعه الأصلي حين تزول تلك المؤثرات، وتكون حالة الاستقرار على أربع صور: (١) حالة ثابتة steady state، (٢) حالة دورية peridodic (ظ) (٣) حالة شبه دورية (ظ)، حالة هيولية (ظ).

إعادة الاستنظام renormalisation عملية رياضية لتهديب المعادلات الرياضية بحيث تُنقى من نقاط عدم الاتصال واللانهايات، متبّعة أساساً فى دراسات تفاعلات الجسيمات الأولية فى الفيزياء، اقتبسه فايجنباوم للتطبيق فى دراسات الهيولية.

بُعد كسرى (*) fractional dimention: تتميز الأشكال الهندسية المعتادة بأنه لها أبعاد بعدد صحيح: الخط المستقيم ١، الشكل المسطح ٢، شكل الفراغى ٣، الزمكان فى النظرية النسبية ٤، (ومن الممكن تصور أشكال ذات أبعاد أكثر). ولكن الشكل الفراكتلى (ظ) تكون له أبعاد كسرية معبرة عما به من عدم انتظام. ويفسر ثبات البعد الكسرى للشكل الفراكتلى (ظ) تمتعه بظاهرة التماثل الذاتى (ظ) أو المقياسية (ظ).

تباعد divergance: متسلسلة رقمية تتزايد أرقامها إلى ما لا نهاية.

تثبيت النسق mode locking: ضبط ترددذبذبة عن طريقذبذبة أخرى.

تشعب (ثنائى) (*): ظ تفرع ثنائى.

تغذية خلفية feedback: تأثير المخرجات على المدخلات، من العوامل المؤدية إلى نشأة الظواهر الهيولية (مثال الاحتكاك حين يؤثر فى السرعة التى تؤثر بدورها على الاحتكاك). وهى على نوعين، إيجابية وسلبية. فى الأولى يكون تأثير المخرجات على المدخلات تعزيزاً، وفى الثانية يكون التأثير إخماداً. الإيجابية هى التى تؤدى إلى لاختية العلاقات، ومن ثم العشوائية، بينما السلبية تؤدى إلى استقرار النظم.

تفرع ثنائي (*) bifurcation: ظاهرة تتكرر دورياً بين قيمتين أربع قيم ثم ثمانية، وهكذا إلى أن تختلط الدورات فتبدو عشوائية، ولكنها في الواقع تكون قد دخلت في طور الهيولية. التفرع الثنائي أحد طرق الدخول في الهيولية بالإضافة إلى شبه الدورية (ظ) والتقطع (ظ).

تقارب convergence: الخصيصة الجوهرية للأشكال الفراكتلية، تعني أن الشكل الفراكتلي يتكون من أشكال متماثلة تتصاغر باستمرار إلى ما لا نهاية، وهو مصطلح يعتبر مرادفاً لمصطلح المقياسية. السبب في هذا التماثل هو ثبات البعد الكسري (ظ) للشكل.

جاذب attractor: منحنى يمثل النظم المستقرة في فضاء الطور (ظ) الذي إما لولب ينتهي إلى نقطة (حالة ثبات) أو إلى شكل مقفل (ظاهرة ترددية)، أو إلى شكل مقفل معقد (حالة شبه الدورية، يأخذ المنحنى شكل طارة torus) أو حالة هيولية (جاذب عجيب أو غريب).

جاذب عجيب (ظ: جاذب غريب).

جاذب غريب strange attractor: جاذب (ظ) يمثل حالة الهيولية، يظل متغيراً بلا نهاية بحيث لا يتقاطع مع نفسه أبداً (لا تتكرر حالة من حالاته)، فالمسارات تتقارب وتتباعد بلا انقطاع، ولكن لا تنتشت نقاطها عشوائياً، بل تظل في حيز محدد. يعتبر هندسياً شكل فراكتلي (ظ). يعتبر لورنز أول من رسم مثل هذا الجاذب، وقد رسمه لبيان فضاء الطور (ظ) لتيارات الحمل. ظهر هذا الاصطلاح لأول مرة في بحث بعنوان "حول طبيعة الاضطراب" وضعه رويل وتاكينز، ويدور نزاع (ودي) بينهما على من له شرف وضعه.

حدوة سمول small hioseahoe: التصوير الطوبولوجي (ظ) للجاذب الغريب (ظ). حيث يصور ما يحدث من تقارب بين في مساراته بانكماش في فضاء الطور (ظ) وما يحدث من تباعد بمط لفضاء الطور، إلى أن يأخذ فضاء الطور شكل حدوة الحصان.

خريطة الإعادة return map ظ: خريطة بوانكريه.

خريطة بوانكريه Poincre map: أسلوب رياضي لتحليل الجاذبات (ظ) في فضاء الطور (ظ) للتصرفات المعقدة التي تتضمن أكثر من ثلاثة عوامل، الأمر الذي يستحيل معه رسمها، حيث يكون لفضاء الطور أكثر من ثلاثة أبعاد.

يعتمد الأسلوب على أنه بدلا من رسم الجاذبات تفصيلياً، الاكتفاء برسم تقاطعاتها مع مستوى معين، يوضع إما في أكثر المواضع أهمية، أو على فترات زمنية متساوية. دورى periodic: نظام يتكرر على دورات منتظمة، مثال: حركة البندول. تتميز النظم الهيولية بأنها لا دورية (ظ).

رقم ليابونوف^(*) Lyapunov exponent: هذا الرقم يعطى وسيلة لبيان الخصائص الطبولوجية المتعلقة بمفاهيم مثل عدم القابلية للتنبؤ. هذه الأرقام في أي نظام تعطى طريقة لقياس التأثيرات المتعارضة للمط والانكماش والطي في فضاء الطور للجاذب. إنها تعطى صورة لكافة الخصائص المؤدية إلى الاستقرار أو عدم الاستقرار. فالرقم أكبر من الصفر يعنى المط، حيث تتباعد النقاط القريبة، الأقل من الصفر يعنى الانكماش. ولجاذب ذو نقطة محددة، يكون للجاذب رقما سالبا، حيث يكون التجاذب إلى الداخل، تجاه نقطة الاستقرار. والجاذب الذى ينتهى إلى حركة متذبذبة يكون ذو رقم يساوى الصفر بالضبط، ورقم آخر سالب. أما الجاذب الغريب، فقد اكتشف أن له رقما موجبا.

شبه دورى quai-periodic: نظام يتأرجع بين دورتين ترددهما ليس متناسبا كأعداد صحيحة، يمثل فضاء الطور للظاهرة شبه الدورية فى شكل طارة torus، وشبه الدورية هى أحد طرق الدخول فى الهيولية بالإضافة للتفرع الثنائى والتقطع.

طوبولوجيا topology: أحد فروع الرياضيات، يدرس ما يجرى على الأسطح من التواءات ومط وانكماش وسطي، وغير ذلك من تغيرات، وتأثير ذلك على الأشكال المرسومة عليها. هذه هى الطريقة الرياضية التجريدية لرسم الجاذبات الغريبة. فالمط مثلا يقابل زيادة الطاقة فى النظام، بينما الانكماش يعنى تشتتها منه، وهكذا.

فئة كانتور Cantor set: فئة وضعها الرياضى كانتور تنتج من محو ثلث مستقيم من منتصفه، ثم تكرار ذلك على ما يتبقى من مستقيمت، وهكذا. تعتبر أحد الوسائل لتحويل النظم للهيولية، وقد علل بها ماندلبروت الشوشرة التى تظهر فى بعض خطوط الاتصالات.

فراكتال^(*) fractal: شكل هندسى يتكون من تكرار نسق معين على مستويات أقل وأقل إلى ملايين المرات، فيبدو للعين المجردة عشوائياً. وهو يتميز بأنه كسرى الأبعاد. وقد تبين أن الجاذبات الغريبة (ظ) يعبر عنها بمنحنيات فراكتالية، فهى دائمة التغير، ولكن لا تتقاطع مع نفسها.

فضاء الطور(*) phase space: شكل بياني متعدد الأبعاد، يبين العلاقة بين المتغيرات الخاصة بظاهرة ما.

لا دورى aperiodic: نظام دائم التغير، ولكن ليس في دورات منتظمة، مثال، الطقس. كافة النظم الهيولية تتسم بهذه الخصيصة (قا: دورى).

مائع fluid: اسم جامع يطلق على المواد وهي في حالة السيولة أو الحالة الغازية.

محاكاة simulation: نموذج رياضي (ظ: نمذجة رياضية)، قد يمثل برنامج حاسوبي، يحاكي ظاهرة ما، مثال: الطقس، التكاثر البيئي لكائن ما.

محاكي simulator: جهاز يعمل لتمثيل تصرف ظاهرة ما، يتحكم فيه نموذج لمحاكاة (ظ) الظاهرة. تستخدم المحاكيات للأبحاث، وكذلك للتدريب (قيادة السيارات أو الطائرات أو التدريبات العسكرية...الخ).

المعاودة(*) recursion: تكرار عملية معينة، بحيث يستخدم خارج كل خطوة كمدخل للخطوة التالية.

مقياسية(*) scaling: ظاهرة أو عملية تتكرر بنفس النمط على مقاييس متدرجة في الصغر أو في الكبر، وهي أساس الأشكال الفراكتلية. فالظاهرة المقاسية phenomena scaling كالسحب والزلازل لا يتغير عدم انتظامها، معبر عنه بالبعد الكسرى، بالمرّة حين يتغير مقياس النظر إليها.

نظام تشتتي dissipative system: نظام تشتت الطاقة فيه (بسبب الاحتكاك مثلاً)، في حالة عدم تعويض الطاقة تنتهي النظم إلى السكون، أما عند تعويضها فيمكن أن تصل لحالة استقرار (ظ).

نظام محافظ conservative: نظام محافظ على الطاقة (مثل البندول الذي يستخدم في الساعات)، يمكن أن يدخل في حالة الهيولية، ولكن لا يتميز فضاء الطور (ظ) له بجاذب غريب. (قا: نظام تشتتي).

نمذجة رياضية mathematical modelling: وضع مجموعة من معادلات رياضية تصف تصرف ظاهرة ما.

هيولية(*) chaotic state: حالة عشوائية ظاهرياً، ولكنها في الواقع تتضمن انتظاماً، ويتحول النظام إليها بطريق من الطرق الثلاثة الآتية: التفرع الثنائي (ظ) أو شبه الدورية (ظ) أو التقطع (ظ). يعبر عن حالة الهيولية للنظم التشتتية (ظ) بجاذب غريب (ظ).

قاموس لاتيني - عربي

aperiodic	لا دوري
bifurcation	تفرُّع (تشعب) ثنائي (*)
attractor	جاذب (*)
chaotic state	حالة هيوولية (*)
convergence	تقارب
divergance	تباعد
fractal	فراكتال
fractional dimention	بُعد كسري
Lyapunov exponent	رقم لياپونوف (*)
mathematical modelling	نمذجة رياضية
pattern	نمط، نسق
periodic	دوري
phase space	فضاء الطور
scaling	مقياسية (*)
simulation	محاكاة
simulator	محاكي
strange attractor	جاذب غريب (*)

خريطة لوجستية _____ logistic map
 معادلة الفرق اللوجستية _____ logistic difference equation
 المعاودة _____ recursion
 فئة ماندلبروت _____ Mandelbrot set
 بعد هاوسدورف _____ Hausdorff dimension
 تثبيت النسق _____ mode locking
 إنتروبيا _____ entropy
 شبه دوري _____ quasiperiodic

أهم الشخصيات الواردة في الكتاب

Kolmogorov A.N. أن كولموجوروف: وضع مع سيناى رياضيات بارعة عن طريقة تطبيق "معدل الإنتروبيا بالنسبة للزمن" على الصور الهندسية للأسطح التي تطوى وتُمتط لفضاء الطور. والفكرة الجوهرية هي وضع مربع صغير حول مجموعة من الظروف الأولية، كما لو قمنا بوضع مربع صغير على سطح بالون، ثم يحسب تأثير ما يجرى على المربع من التواءات وتمدد. فهو قد يتمدد فى اتجاه واحد، بينما يظل ضيقاً فى اتجاه آخر، ويقابل التغير فى المساحة دخول لعنصر اللاتأكد فى ماضى النظام، أى اكتساب أو فقد للمعلومات.

Abrabam, Ralph رالف إبراهيم: استاذ رياضيات، صاحب سميل وشجع شو، قام بدراسة البيئة من خلال فرض الجايا، ووضع نموذج مكون من ثلاثة ألوان لدراسة التوازن البيئى.

Ahlers, Günter جينتر ألس: تجريبى من شركة AT&T قام بتجاوب فى موضوع التحول السائلى الفائق.

Barnsley Michael ميشيل برانسلى: ترجمة معادلات فاينباوم إلى الأرقام المركبة، إنشاء الأشكال الفراكتلية عن طريق تكرار قوانين بسيطة عدداً كبيراً من المرات، وهو ما أسماه "اللعبة الهولوية"، واكتشاف الطريقة لاستنباط القوانين للقيام بذلك لشكل معين (نظرية الملصقات collage theorem). احتمال أن تكون الطبيعة تنهج نفس المنهج فى إنتاج أشكالها الفراكتلية، وهو الأعم من أشكالها، مثلاً: أوراق الشجر.

Burke. William ويليام بروك: استاذ شو، له أبحاث فى موجات الجاذبية، أعطاه معادلات لورنز لدراستها، فوجه نظره للتفرغ للنظم الديناميكية.

Cantor, George جورج كانتور: عالم رياضى من علماء القرن التاسع عشر، وضع فئة معروفة باسمه، استخدمها ماندلبروت كأساس لظاهرة المقياسية.

Cruchfield, James جيمس كرتشفييلد: العضو الرابع في جماعة النظم الديناميكية.
Douady, Adrien أدريان دودي: رياضي فرنسي، مع هيلارد في دراسة فئة
ماندلبروت.

Farmer, Doyne دوين فارمر: العضو الثاني في الجماعة

Fatou, Pierre بيير فاتو: اشترك مع جوليا في وضع فئة جوليا.

Feigenbaum, Mitchell متشل فايجنباوم: رياضي له الفضل في اكتشاف ظاهرة
العمومية، إذ اكتشف أن تقارب الظواهر الهولوية يتم بنسبة واحدة، كما اكتشف
متواليات لتفرعات النظم الهولوية عرفت باسمه، ولها علاقة بأشكال فئة ماندلبروت.

Fisher, Michael ميشيل فيشر: باحث في التحول الطوري

Ford, Joseph جوزيف فورد: أحد منصارى الهولوية من معهد جورجيا
التكنولوجي. كان يرى أنه في دراسة اللاخطية يكمن مستقبل الفيزياء بأسره، ونصب
من نفسه مناراً لكل من أراد أن يبحر في هذا الاتجاه، من خلال المقالات العلمية.
كانت خلفيته في الهولوية غير التشتتية non-dissipative chaos، في مجال الفلك
وفيزياء الجسيمات الأولية. كان على دراية طيبة بمجهودات العلماء السوفيت في هذا
المجال، كما جعل من أهدافه إقامة الصلة بين كافة من ينتهجون هذا فورد. أقام مع
جوليو كازاتي أول مؤتمر عن الهولوية عام ١٩٧٧.

Giullion Casati جوليو كازاتي: أقام مع جوزيف فورد أول مؤتمر عن الهولوية عام
١٩٧٧.

Glass, Leon ليون جلاس: من جامعة مكجل McGill في مونتريال بكندا كان
متخصصاً في الفيزياء والكيمياء، حيث أدى شغفا بالأرقام وباختلال النظم، وأتم
رسالة الدكتوراة في موضوع الحركة الذرية داخل السوائل قبل أن يتجه لأبحاث
اضطرابات القلب، تجربة عينات من أجنة الدجاج.

Goldberger, Ary آري جولدبرجر: كلية الطب بجامعة هارفارد

Goldberger, Ary آري جولدبرجر: مساعد مدير مركز أبحاث اضطرابات القلب
في مستشفى بث إسرائيل، اقترح أن يكون النظام الديناميكي السليم مميزاً بهيكل
فراكتلي، بحيث يتيح العمل عند مدى واسع من الإيقاعات، على أساس أن العمليات
الفراكتلية المصحوبة بطيف واسع من تعدد المقاييس هو غنى بالمعلومات. بينما الحالات

الترددية في المقابل تعكس طيفاً ضيقاً ومحددة بتكرارات مقبضة، عارية عن المعلومات، وقد اقترح مع بعض الباحثين أن معالجة هذه الاضطرابات قد يعتمد توسيع مجال النظام، أى قابليته العمل على مدى واسع من الترددات دون الوقوع فى قبضة تثبيت النسق.

Gollub, Jerry جيري جولب: تعاون مع سوينى فى دراسات تحول الطور.

Hénon, Michel ميشيل هينون: فلكي من مرصد نيس رسم الجاذبات الغريبة لنظم فلكية، مستخدماً نظام التطبيق (mapping) لإجراء عمليات الطي والمط المطلوبة لرسم هذه الجاذبات طبولوجياً.

Hoppensteadt, Frank فرانك هوبنستد: عالم رياضى شغف بالبيولوجيا، درس المعادلة اللوجستية.

Hubbard, John جون هبارد: تحليل طريقة نيوتن فى التقريب، تطبيق نظرية التدفق فى النظم الديناميكية عليها، اكتشاف التداخل عند الحدود. لقد شعر أن وضع خرائط لطريقة نيوتن ليست إلا واحدة من عائلة لم تُكتشف بعد من الصور التى تعكس تصرف القوى فى العالم الواقعى. وكان ميشيل برانسلى يبحث عن عناصر أخرى من العائلة. أما بنوا ماندلبروت، كما علم فيما بعد، فقد كان يبحث فى الجد الأعلى لهذه العائلة (فئة ماندلبروت). استخدم لأول مرة أسلوب تحليل الأعداد المركبة على النظم الديناميكية. عمل دراسات عن فئة ماندلبروت "وقد استخدم دودى وهبادر سلسلة بارعة من الرياضيات الحديثة لإثبات أن كل جزيئية متطايرة لها ارتباط بأصلها. كما أثبتا أنه ما من جزء متطاير إلا ويترك آخر مكانه، شبيه له، ولكن ليس فى تطابق تام، وأن كل جزء جديد ينشأ محاطاً بخطوط اتصاله المتشعبة، تحمل فى نهاياتها براعم الأشكال الجديدة. يالها من معجزة فى عالم التصغير اللامتناهى!".

Huberman, Bernardo برناردو هيرمان: مركز زيوبكس للأبحاث، أبحاث فى الشيزوفرانيا.

Huygens, Christian كرسيتيان هايجنز: لعالم فيزيائى هولندى، اخترع البندول فى القرن السابع عشر وكذا علم الديناميكا الكلاسيكى، توصل إلى أثر التغذية الخلفية السلبية فى ثبات النظم الديناميكية، حين لاحظ ذات يوم أن مجموعة من البندولات تتحرك فى تزامن تام، واتضح أن السبب هو انتقال الذبذبات خلال الحائط الخشبى (ظاهرة تثبيت النسق mode locking).

Ideker, Raymond E. ريموند آيدكر: من كلية طب جامعة ديوك Duke، أبحاث القلب. تصميم جهاز لمواجهة الارتجاف البطيني.

Julia, Gaston جاستون جوليا: رياضي واصل فئة جوليا، التي اتخذها ماندلبروت أساساً لوضع الفئة المعروفة باسمه

Kadanoff, Leo ليو كادانوف: باحث في التحول الطوري في مجال التمثيل. تصور المقياسية أثناء هذا التحول. تصور العمومية في هذه العمليات، بمعنى أن قواعدها تسري على كل عمليات التحول الطوري مهما كان مجالها.

Kohen, Richard ريتشارد كوهين: طبيب القلب والفيزيائي وجد في برنامج مشترك بين هارفارد إم.أي.تي. مدى واسعاً من تسلسلات تضاعف الفترات في الكلاب.

Landqu, Lev ليف لاندو: عالم سوفيتي وضع معادلات تبين سير الاضطرابات في السوائل، كشف التحليل الهولي عن خطئها.

Lanford, Oscar III أوسكار لانفورد الثالث: رياضي أثبت ظاهرة العمومية رياضياً عام ١٩٧٩.

Libchaber, Albert ألبرت ليبشابر: بولندي يهودي، أجرى تجارب رائدة في تيارات الحمل للهليوم السائل.

Lorenz, Edward إدوارد لورنز: رياضي، باحث في الطبيعة الجوية بمعهد M.I.T، الأب الروحي لدراسات الهولوية، بدأ دراساته في الستينات. وضع نماذج حاسوبية لنمذجة الطقس وتيارات الحمل وديناميكية المواع بشكل عام. أطلق على ظاهرة الحساسية للظروف الأولية تعبير: "تأثير الفراشة"، مكتشف "جاذب لورنز" الذي يعتبر حجر الزاوية في كافة الدراسات التالية. ملحوظة: لا يجب الخلط بينه وبين عالم الفيزياء الشهير في بداية هذا القرن، هندريك لورنز الحائز على جائزة نوبل عام ١٩٠٢، والمتوفي عام ١٩٢٨.

Mandelbrot, Benoit بنوا ماندلبروت: رياضي فرنسي مؤسس الهندسة المطبقة في التحليل الهولي. وضع الكثير من المفاهيم المتعلقة بالهولوية: منها: أشكال الفراكتال، المقياسية، الأبعاد الكسيرة، (وأثبت أنها ثابتة لأي شكل غير هندسي، مهما بلغت درجة عدم استوائه، ووضع الأسلوب الرياضي لإيجاد البعد الكسري للأشكال غير المستوية)، التماثل الذاتي، طبق التحليل الهولي على العديد من المجالات العلمية المختلفة، منها الاقتصاد، الاتصالات، وعلم النفس. واصل "فئة

ماندلبروت Mandelbrot set (٨) كواحدة من أهم الفئات الرياضية وأعقدها على الإطلاق، اكتشاف أن التماثل الذاتي للأشكال الفراكتلية ليس تطابقاً تاماً في هذه الفئة (را: دراسات هبارد عن الحدود ومحاولته فهم فئة ماندلبروت).

Mandell, Arnold أرنولد ماندل: طبيب وعالم في النظم الديناميكية، تحول إلى دراسة الهولوية عام ١٩٧٧، حين وجد "تصرفات غريبة" في بعض أنزيمات المخ لا يمكن تبريرها إلا عن طريق نوع حديث من رياضيات اللاخطية. شجع على دراسة البروتينات كنظم ديناميكية، بدلاً من الاكتفاء بدراسة أشكالها الاستاتيكية.

Marcus, Phillip فيليب ماركوس: فلكي، جامعة كورنل. دراسة صور فوياجير للبقعة الحمراء للمشتري. أثبت أن الظاهرة هي تطبيق لحالة الهولوية على النظم الديناميكية، ولذا فقد اعتبر نفسه عالماً في الهولوية وليس في الفلك أو الرياضيات.

May, Robert روبرت ماي: عالم استرالي كان في البداية فيزيائياً ثم تحول للدراسات البولوجية، اكتشف التفرع الثنائي.

Mines, George جورج مينز: جامعة ماكجل بمونتريال، تمكن مينز في من صناعة جهاز صغير عال الدقة لإنتاج نبضات كهربية القلب. طبقة على نفسه.

Packard, Norman نورمان باكارد: العضو الثالث من جماعة النظم الديناميكية.

Heinz-Otto eitzen هاينز-أوتو بايتجن: بحث في التغير تطوري في مغنطة المعادن، أقام معرضاً للأشكال الفراكتلية.

Poincaré, Henri هنري بوانكاريه: عالم فيزيائي شهير عاش في نهاية القرن الماضي وبداية القرن العشرين، رأى في علم الطبولوجيا والنظم الخطية وجهان لعملة واحدة. يُعتبر أول من تنبأ بالهولوية، ووصل إلى اكتشافات قريبة من لورنز.

Ritchardson, Lewis لويس ريتشاردسون: عالم من بداية القرن بحث في بعض الموضوعات المتعلقة بالهولوية، منها دراسة الشوائب والتنبؤ الجوي، ألهم ماندلبروت في أبحاثه.

Ruelle, David دافيد رويل: عالم بلجيكي عمل مع سويني. واصل مفهوم "الجاذب الغريب" مع تاكينز، ووضع نموذجاً لعمل القلب.

Schaffer, M. شافر: عالم بيئي، بين أن انتشار الأوبئة يخضع لجاذب غريب بعده الكسري حوالي ٢.٥، كما حسب بقية الخصائص، كرقم ليابانوف ورسم خرائط

بوانكريه، مما ساعد على مواجهتها. اتجه للهيولية بعد أن ثبت لديه فشل نموذجه عن تكاثر الحشرات.

Scholtz, Christopher كرسدوفر شولتز: عالم طبق مفاهيم ماندلبروت على دراسة الزلازل.

Schwenk, Theodor تيودور شفنك: واضع كتاب "الفوضوية الحساسة"، تابع فيه ملامح تدفقات المياه في الأنهار.

Shannon, Claude كلود شانون: واضع نظرية المعلومات

Show, Robert روبرت ستيتسون شو: العضو الأول في جماعة النظم الدينامكية ومؤسسها، ربط الهيولية بنظرية المعلومات، فنظر للجاذب الغريب علي أنه مولّد للمعلومات عن النظام. وضع نظاماً لاستخلاص الجاذب الغريب من مجموعة البيانات فقط (عن طريق المياه المتساقطة من صنبور)، دون حاجة لمعرفة النظام فيزيائياً.

inai, Yasha ياشا سيناي: اشترك مع كولوجوروف في وضع رياضيات حول معدل الإنتروبيا مع الزمن.

Smale, Stephen ستيفان سمول: رياضي، جامعة كاليفورنيا. أول من قام بدراسة منهجية لتصرف النظم الديناميكية على أساس شامل وليس تجزئياً. خليفة بوانكريه في تطبيق الطبولوجيا على النظم الديناميكية. واضع الشكل المسمى "حدوة سمول Small's horseshoe" لتمثيل تغيرات النظم الديناميكية طبولوجياً.

Swinney, Harry هاري سويني: عالم تجريبي عمل في مجال تغير الحالات، أو تحول الطور. اكتشف خطأ نظرية لاندو عن الاضطرابات في الموائع.

Takens, Floris فلوريس تاكنز: اكتشف الجاذبات الغريبة مع دافيد رول، كل على انفراد. وضع الأساس الرياضي لأسلوب جماعة النظم الديناميكية مع استخلاص الجاذبات الغريبة من تدفق البيانات الواقعية.

Thompson, D'Arcy دارسي تومسون: عالم بيولوجي من أوائل القرن درس البيولوجيا من وجهة نظر الهيولية.

Ueda, Yoshisuke يوشيسوك أيدا: باحث ياباني وضع عدداً من الجاذبات الغريبة للدوائر الإلكترونية.

Koch von, Halge هالچ فون كوخ: عالم رياضى قديم واضع منحنى باسمه،
يعتبر شكلاً فراككتلياً.

Wilson, Kenneth كينيث ويلسون: حائز على جائزة نوبل عام ٨٢ عن التحوُّل
الطورى، طبق عليها قواعد إعادة الاستنظام (كبدل للتعامل التقليدى للنظم الخطية عن
طريق تقريبها) وفكة المقياسية.

Winfrey, Arthur آرثر وينفرى: عالم بيولوجيا كان له غرام بالهندسة، قام
بأبحاث عن الساعة البيولوجية.

York. James جيمس يورك: من جامعة ميريلاند، درس تكاثر الكائنات من
الوجهة الهيولية. مقترح مصطلح chaos.

أهم المفردات الواردة فى الكتاب

تكرارية iteration	بيولوجيا	أرض، المجال المغناطيس لـ
تكوكب، تعتقد clustering	/الرياضيات فى	أرق insomnia
تنبؤ	/نمذجة الـ/	أشكال فاينمان
التنظيم الذاتى	النظرية/ ظ: فسيولوجيا	أعداد تخيلية ظ: أعداد مركبة
توازن	تأثير الفراشة	أعداد فاينباوم
توتر سطحى	تجريب	أقمار صناعية
توزيع طبيعى	التجزئية	ألمانيا
توصيل فائق	تحديدية determinism	أنهار
تيار الخليج	تحول الطور	أوراق شجر leaves
تيارات الحمل	تدفق	أوعية دموية
جاذب أودا Ueda attractor	تدفق Coutte-Tylor	إرادة حرة
جاذب روسلر	ترابط النسق؟ mode locking	إعادة الاستنظام، نظرية
جاذب غريب	ترانزستور	إعصار cyclone
جاذب لورنتز	التزيد redundancy	إقليدس
جاذب هينون	التشابه الذاتى	إنتروبيا
جاذب/المفيض لـ/basins of	تشتت dissipation	إيطاليا
النقطة الثابتة (الحالة	تشعبات dendrites	الاتحاد السوفيتى
المستقرة steady state)/المتذبذب	تشفير (تعمية) cryptology	اتزان equilibrium
oscillating/اتزان الـظ:جانب	تشويش ظ شوشرة	احتكاك
غريب	تصور بوانكاريه	ارتجاف بطينى fibrillation
الجاذبات الهيولية ظ: جاذبات	تضاعف الفترة	اسفنجة منجر
غريبة	تطور	اضطراب
جاذبية	تغذية خلفية	اقتصاد
جايا	تفاضل وتكامل ظ: معادلات	انقطاع الاتصال discontinuity

بحرية الولايات المتحدة	تفاضلية	جماعة النظم الديناميكية
برج إيفل	تفاعل بلزوف- زابوتسكي	جيودينامو، ظ. أرض، المجال
بروتين	تفرع ثنائي/فى الفسيولوجيا/ظ	المغناطيس لـ
بعد dimension	تضاعف الدورات، شبه الدورية	حاسوب فائق
بعوض	intermittency, quasiperiodicity	حاسوب
البقعة الحمراء للمشتري	التقريب	حدوة الحصان
بلجيكا	تقريب نيوتن	حدود boundaries/ فى تكوين
بنول	تكاثر	الكشف الثلجية
بورصة	تكرار iteration ظ: تغذية خلفية،	الحرب العالمية الثانية
بيسبول	معادلات	حشرات
خشية سيرينسكى	طبيعة جوية	كروموزومات
حصبة	طقس	كشف ثلجية
حوض	طوبولوجيا	كسوف
خسوف	طيف ترددي	كهرباء
خطأ error	عاصفة	كوارك
خط	عدد مركب	كواكب
دن.أ.	عدم اتزان	كود مورس
دخان	عدم تنبؤ	كويكبات asteroids
تأثير عبور المحيطات jet lag	عدم يقين	لاخطية
دوامات	عشوائية	لادورية
دورات	عصور جليدية	aperiodicity/والحياة/واللاتنبؤ
دينامو	عقاقير، فى الطب النفسى	unperiodicity
ديناميكية الموانع fluid dynamics	علم	لانظام disorder
رقم ليابونوف	علم البيئة	لعبة هيولية
روليت	عمومية	لغة
رياح	فئة جوليا	لغط القلب heart arrhythmia
رياضيات	فئة كانتور	لغويات
زلازل	فئة ماندلبرو	لهب
ساعة بيولوجية/ظ: circadian	فراكتل	ليزر
rythms	فرنسا	المؤتمر العالمى للرياضيين
ساتا كروز	فسيولوجيا	مائع

متوازن قضائي space trapeze	فضاء الطور	سببية
متوسطات	فن	سجادة سيرينسكى
مجرة	فيزياء	سحب
مجلة "الطبيعة" Nature	فيزياء الجسيمات	سيارات
محيط	القانون الثانى للترموديناميكا	شاطئ
المحيط الأطلنطى	قطع مكافئ	شبه البورية quasiperiodicity
مخ	القلب	شوشرة
مد وجزر	القنبلة الذرية	شيروفرينيا
مذنب هالى	قنديل البحر	الصين
مرض	نمذجة	ضوضاء ظ: شوشرة
	نمو مالتيسى	المشتري
	الهواء الجوى/ الهولوية فى	مطر
	هيروشيما	معادلات تفاضلية ظ: معادلات
	الهولوية الكمية	معادلة
	هولوية ...	معادلة Duffing
	وباء	معادلة الفروق التربيعية ظ: معادلة
ورق الشجر ferns		الفروق اللوجستية
وصلة جوزيفسون		معادلة الفروق اللوجستية
		معادلة نافير-ستوكس Navier-
		Stocks equation
		معاودة
		معلومات
		معماريات architectures
		مقاومة الهواء
		مقياسية
		منحنى التوزيع الطبيعى
		منحنى الجرس (ظ: منحنى التوزيع
		الطبيعى)
		منحنى كوخ
		الميكانيكا الكمية
		النازى

نحل
النسبية
النظام الشمسى
النظام المناعى
نظرية التوحيد الكبرى
نظرية المعلومات
نظم ديناميكية لاختيئة
نظم ديناميكية ...
نماذج models
نماذج patterns

المشروع القومى للترجمة

- | | | |
|--|------------------------------|---|
| ١- اللغة العليا (طبعة ثانية) | جون كوين | ت : أحمد درويش |
| ٢- الوثنية والإسلام | ك. مادهو بانيكار | ت : أحمد فؤاد بليغ |
| ٣- التراث المسروق | جورج جيمس | ت : شوقي جلال |
| ٤- كيف تتم كتابة السيناريو | انجا كاريتنكوفا | ت : أحمد الحضري |
| ٥- ثريا فى غيبوبة | إسماعيل قصيح | ت : محمد علاء الدين منصور |
| ٦- اتجاهات البحث اللساني | ميلكا إفيش | ت : سعد مصلوح / وفاء كامل فايد |
| ٧- العلوم الإنسانية والفلسفة | لوسيان غولدمان | ت : يوسف الأنطكي |
| ٨- مشعلو الحرائق | ماكس فريش | ت : مصطفى ماهر |
| ٩- التغيرات البيئية | أندرو س. جودى | ت : محمود محمد عاشور |
| ١٠- خطاب الحكاية | جيرار جينيت | ت : محمد معتصم وعبد الجليل الأزدي وعمر طي |
| ١١- مختارات | فيسوفا شيمبوريسكا | ت : هناء عبد الفتاح |
| ١٢- طريق الحرير | ديفيد براونستون وايرين فرانك | ت : أحمد محمود |
| ١٣- ديانة الساميين | روبرتسن سميث | ت : عبد الوهاب علوب |
| ١٤- التحليل النفسى والأدب | جان بيلمان نويل | ت : حسن المودن |
| ١٥- الحركات الفنية | إدوارد لويس سميث | ت : أشرف رفيق عفيفي |
| ١٦- أثينة السوداء | مارتن برنال | ت : يشراف: أحمد عثمان |
| ١٧- مختارات | فيليب لاركين | ت : محمد مصطفى بدوي |
| ١٨- الشعر النسائي فى أمريكا اللاتينية | مختارات | ت : طلعت شاهين |
| ١٩- الأعمال الشعرية الكاملة | جورج سفيريس | ت : نعيم عطية |
| ٢٠- قصة العلم | ج. ج. كراوثر | ت : يمنى طريف الخولى / بدوي عبد الفتاح |
| ٢١- خوذة وألف خوذة | صمد بهرنجى | ت : ماجدة العناني |
| ٢٢- مذكرات رحالة عن المصريين | جون أنتيس | ت : سيد أحمد على الناصري |
| ٢٣- تجلى الجميل | هانز جيورج جادامر | ت : سعيد توفيق |
| ٢٤- ظلال المستقبل | باتريك بارندر | ت : بكر عباس |
| ٢٥- مثنوى | مولانا جلال الدين الرومى | ت : إبراهيم الدسوقي شتا |
| ٢٦- دين مصر العام | محمد حسين هيكل | ت : أحمد محمد حسين هيكل |
| ٢٧- التنوع البشرى الخلاق | مقالات | ت : نخبة |
| ٢٨- رسالة فى التسامح | جون لوك | ت : منى أبو سنه |
| ٢٩- الموت والوجود | جيمس ب. كارس | ت : بدر الديب |
| ٣٠- الوثنية والإسلام (ط٢) | ك. مادهو بانيكار | ت : أحمد فؤاد بليغ |
| ٣١- مصادر دراسة التاريخ الإسلامى | جان سوفاجيه - كلود كاين | ت : عبد الستار الطرجى / عبد الوهاب علوب |
| ٣٢- الانقراض | ديفيد روس | ت : مصطفى إبراهيم فهمي |
| ٣٣- التاريخ الاقتصادى لإفريقيا الغربية | أ. ج. هويكنز | ت : أحمد فؤاد بليغ |
| ٣٤- الرواية العربية | روجر آلن | ت : حصّة إبراهيم المنيف |
| ٣٥- الأسطورة والحداثة | بول . ب . ديكسون | ت : خليل كفت |

- ٣٦- نظريات السرد الحديثة
٣٧- واحة سيوة وموسيقاها
٣٨- نقد الحداثة
٣٩- الإغريق والحسد
٤٠- قصائد حب
٤١- ما بعد المركزية الأوروبية
٤٢- عالم ماك
٤٢- الذهب المزدوج
٤٤- بعد عدة أصياف
٤٥- التراث المغفور
٤٦- عشرون قصيدة حب
٤٧- تاريخ النقد الأدبي الحديث (١)
٤٨- حضارة مصر الفرعونية
٤٩- الإسلام في البلقان
٥٠- ألف ليلة وليلة أو القول الأسير
٥١- مسار الرواية الإسبانية الأمريكية
٥٢- العلاج النفسى التدعيمى
٥٣- الدراما والتعليم
٥٤- المفهوم الإغريقى للمسرح
٥٥- ما وراء العلم
٥٦- الأعمال الشعرية الكاملة (١)
٥٧- الأعمال الشعرية الكاملة (٢)
٥٨- مسرحيتان
٥٩- المحبرة
٦٠- التصميم والشكل
٦١- موسوعة علم الإنسان
٦٢- لذة النص
٦٣- تاريخ النقد الأدبي الحديث (٢)
٦٤- برتراند راسل (سيرة حياة)
٦٥- فى مدح الكسل ومقالات أخرى
٦٦- خمس مسرحيات أندلسية
٦٧- مختارات
٦٨- تناشا العجوز وقصص أخرى
٦٩- العالم الإسلامى فى أوائل القرن العشرين
٧٠- ثقافة وحضارة أمريكا اللاتينية
٧١- السيدة لا تصلح إلا للرعى
- والاس مارتن
بريجيت شيفر
آلن تورين
بيتر والكوت
آن سكستون
بيتر جران
بنجامين بارير
أوكافيو پاث
ألدوس هكسلى
روبرت ج دنيا - جون ف أ فاين
بابلو نيرودا
رينيه ويليك
فرانسوا دوما
ه . ت . نوريس
جمال الدين بن الشيخ
داريو بيانوبيا وخ. م بينياليستى
بيتر . ن . نوفاليس وستيفن . ج .
روجسيفيتز وروجر بيل
أ . ف . ألنجنون
ج . مايكل والتون
جون بولكنجهوم
فديريكو غرسية لوركا
فديريكو غرسية لوركا
فديريكو غرسية لوركا
كارلوس مونييث
جوهانز ايتين
شارلوت سيمور - سميث
رولان بارت
رينيه ويليك
آلان وود
برتراند راسل
أنطونيو جالا
فرنانلى بيسوا
فالتين راسبوتين
عبد الرشيد إبراهيم
أوخينيو تشانج رودريجت
داريو فر
- ت : حياة جاسم محمد
ت : جمال عبد الرحيم
ت : أنور مفيث
ت : منيرة كروان
ت : محمد عيد إبراهيم
ت : عاطف أحمد / إبراهيم فتحى / محمود ماجد
ت : أحمد محمود
ت : المهدي أخريف
ت : مارلين تادرس
ت : أحمد محمود
ت : محمود السيد على
ت : مجاهد عبد المنعم مجاهد
ت : ماهر جويجاتى
ت : عبد الوهاب علوب
ت : محمد برادة وعثمانى الميود ويوسف الأنطكى
ت : محمد أبو العطا
ت : لطفى قطيم وعادل دمرداش
ت : مرسى سعد الدين
ت : محسن مصيلحى
ت : على يوسف على
ت : محمود على مكى
ت : محمود السيد ، ماهر البطوطى
ت : محمد أبو العطا
ت : السيد السيد سهيم
ت : صبرى محمد عبد الغنى
مراجعة وإشراف : محمد الجوهري
ت : محمد خير البقاعى .
ت : مجاهد عبد المنعم مجاهد
ت : رمسيس عوض .
ت : رمسيس عوض .
ت : عبد اللطيف عبد الحليم
ت : المهدي أخريف
ت : أشرف الصباغ
ت : أحمد فؤاد متولى وهويدا محمد فهمى
ت : عبد الحميد غلاب وأحمد حشاد
ت : حسين محمود

- ٧٢- السياسي العجوز ت . س . إليوت
- ٧٣- نقد استجابة القارئ جين ب . توميكنز
- ٧٤- صلاح الدين والمالِك في مصر ل . ا . سيمينوفا
- ٧٥- فن التراجم والسير الذاتية أندريه موروا
- ٧٦- جاك لاكان وإغواء التحليل النفسي مجموعة من الكتاب
- ٧٧- تاريخ النقد الأدبي الحديث ج ٢ رينيه ويليك
- ٧٨- العولة . النظرية الاجتماعية والثقافة الكونية رونالد روبرتسون
- ٧٩- شعرية التأليف بوليس أوسبونسكي
- ٨٠- يوشكين عند «نافورة الدموع» ألكسندر بوشكين
- ٨١- الجماعات المتخيلة بندكت أندرسن
- ٨٢- مسرح ميغيل ميغيل دي أونامونو
- ٨٣- مختارات غوتفريد بن
- ٨٤- موسوعة الأدب والنقد مجموعة من الكتاب
- ٨٥- منصور الحلاج (مسرحية) صلاح زكي أقطاي
- ٨٦- طول الليل جمال مير صادق
- ٨٧- نون والقلم جلال آل أحمد
- ٨٨- الابتلاء بالغرب جلال آل أحمد
- ٨٩- الطريق الثالث أنتوني جينز
- ٩٠- وسم السيف ميغل دي ترباس
- ٩١- المسرح والتجريب بين النظرية والتطبيق باربر الاسوستكا
- ٩٢- أساليب ومضامين المسرح
- الإسبانيون أمريكي المعاصر كارلوس ميغل
- ٩٣- محدثات العولة مايك فيذرستون وسكوت لاش
- ٩٤- الحب الأول والصحة صمويل بيكيت
- ٩٥- مختارات من المسرح الإسباني أنطونيو بوينو بايخو
- ٩٦- ثلاث زنبقات ووردة قصص مختارة
- ٩٧- هوية فرنسا مج ١ فرنان برودل
- ٩٨- الهم الإنساني والابتزاز الصهيوني نماذج ومقالات
- ٩٩- تاريخ السينما العالمية ديفيد روبنسون
- ١٠٠- مساعلة العولة بول هيرست وجراهام تومبسون
- ١٠١- النص الروائي (تقنيات ومناهج) بيرنار فاليط
- ١٠٢- السياسة والتسامح عبد الكريم الخطيب
- ١٠٣- قبر ابن عربي يليه آباء عبد الوهاب المؤدب
- ١٠٤- أوبرا ماهوجني برتولت بريشت
- ١٠٥- مدخل إلى النص الجامع جيرارچينيت
- ١٠٦- الأدب الأندلسي د. ماريا خيسوس روبييرامتي
- ١٠٧- صورة القداثي في الشعر الأمريكي المعاصر نخبة
- ت . فؤاد مجلى
- ت . حسن ناظم وعلى حاكم
- ت . حسن بيومي
- ت . أحمد درويش
- ت . عبد المقصود عبد الكريم
- ت . مجاهد عبد المنعم مجاهد
- ت . أحمد محمود ونورا أمين
- ت . سعيد الغانمي وناصر حلاوي
- ت : مكارم الغمري
- ت : محمد طارق الشرقاوي
- ت : محمود السيد علي
- ت . خالد المعالي
- ت : عبد الحميد شيحة
- ت . عبد الرازق بركات
- ت . أحمد فتحي يوسف شتا
- ت . ماجدة العناني
- ت . إبراهيم الدسوقي شتا
- ت : أحمد زايد ومحمد محيي الدين
- ت : محمد إبراهيم مبروك
- ت : محمد هناء عبد الفتاح
- ت : نادية جمال الدين
- ت : عبد الوهاب علوب
- ت : فوزية العشماوي
- ت : سري محمد محمد عبد اللطيف
- ت : إدوار الخراط
- ت : بشير السباعي
- ت : أشرف الصباغ
- ت : إبراهيم قنديل
- ت : إبراهيم فتحي
- ت : رشيد بنحوي
- ت : عز الدين الكتاني الإدريسي
- ت : محمد بنيس
- ت : عبد الغفار مكاري
- ت : عبد العزيز شبيل
- ت : د. أشرف على دغلور
- ت : محمد عبد الله الجعدي

١٠٨- ثلاث دراسات عن الشعر الأندلسي	مجموعة من النقاد	ت : محمود على مكي
١٠٩- حروب المياه	چون بولوك وعادل درويش	ت : هاشم أحمد محمد
١١٠- النساء فى العالم النامى	حسنة بيجوم	ت : منى قطان
١١١- المرأة والجريمة	فرانسيس هيندسون	ت : ريهام حسين إبراهيم
١١٢- الاحتجاج الهادئ	أرلين علوى ماكليود	ت : إكرام يوسف
١١٣- راية التمرد	سادى پلانت	ت : أحمد حسان
١١٤- مسرحيتا حصاد كونجى وسكان المستنق	رول شوينكا	ت : نسيم مجلى
١١٥- غرفة تخص المرء وحده	فرچينيا وواف	ت : سمىة رمضان
١١٦- امرأة مختلفة (درية شفيق)	سينثيا نلسون	ت : نهاد أحمد سالم
١١٧- المرأة والجنوسة فى الإسلام	ليلى أحمد	ت : منى إبراهيم ، وهالة كمال
١١٨- النهضة النسائية فى مصر	بث بارون	ت : لميس النقاش
١١٩- النساء والأسرة وقوانين الطلاق	أميرة الأزهرى سنيل	ت : بإشراف/ رؤوف عباس
١٢٠- الحركة النسائية والتطور فى الشرق الأوسط	ليلى أبو لغد	ت : نخبة من المترجمين
١٢١- الدليل الصغير فى كتابة المرأة العربية	فاطمة موسى	ت : محمد الجندى ، وإيزابيل كمال
١٢٢- نظام العبودية القديم ونموذج الإنسان	جوزيف فوجت	ت : منيرة كروان
١٢٣- الإمبراطورية العثمانية وعلاقاتها النولية	نيل الكستندر وفنادولينا	ت : أنور محمد إبراهيم
١٢٤- الفجر الكاذب	چون جرای	ت : أحمد فؤاد بليغ
١٢٥- التحليل الموسيقى	سيدريك ثورپ ديفى	ت : سمحه الخولى
١٢٦- فعل القراءة	قولفانچ إيسر	ت : عبد الوهاب علوب
١٢٧- إرهاب	صفاء فتحي	ت : بشير السباعى
١٢٨- الأدب المقارن	سوزان باسنيث	ت : أميرة حسن نويرة
١٢٩- الرواية الاسبانية المعاصرة	ماريا دولورس أسيس جاروته	ت : محمد أبو العطا وآخرون
١٣٠- الشرق يصعد ثانية	أندريه جوندز فرانك	ت : شوقى جلال
١٣١- مصر القديمة (لتاريخ الاجتماعى)	مجموعة من المؤلفين	ت : لويس بقطر
١٣٢- ثقافة العولة	مايك فينرستون	ت : عبد الوهاب علوب
١٣٣- الخوف من المرايا	طارق على	ت : طلعت الشايب
١٣٤- تشريح حضارة	بارى ج. كيمب	ت : أحمد محمود
١٣٥- المختار من نقد ت. س. إليوت	ت. س. إليوت	ت : ماهر شفيق فريد
١٣٦- فلاحو الباشا	كينيث كونر	ت : سحر توفيق
١٣٧- مذكرات ضابط فى الحملة الفرنسية	جوزيف مارى مواريه	ت : كاميليا صبحى
١٣٨- عالم التليفزيون بين الجمال والعنف	إيقلينا تارونى	ت : وجيه سمعان عبد المسيح
١٣٩- النظرية الشعرية عند إليوت وأنونيس	عاطف فضول	ت : أسامة إسبر
١٤٠- حيث تلتقى الأنهار	هربرت ميسن	ت : أمل الجبورى
١٤١- اثنتا عشرة مسرحية يونانية	مجموعة من المؤلفين	ت : نعيم عطية
١٤٢- الإسكندرية : تاريخ ودليل	أ. م. فورستر	ت : حسن بيومى
١٤٣- قضايا التنظير فى البحث الاجتماعى	ديريك لايدار	ت : عدلى السمرى
١٤٤- صاحبة اللوكاندة	كارلو جولدونى	ت : سلامة محمد سليمان

- ١٤٥- موت أرتيميو كروث
١٤٦- الورقة الحمراء
١٤٧- خطبة الإدانة الطويلة
١٤٨- القصة القصيرة (النظرية والتقنية)
١٤٩- النظرية الشعرية عند إليوت وأبونيس
١٥٠- التجربة الإغريقية
١٥١- هوية فرنسا مج ٢ ، ج ١
١٥٢- عدالة الهنود وقصص أخرى
١٥٣- غرام القراءة
١٥٤- مدرسة فرانكفورت
١٥٥- الشعر الأمريكي المعاصر
١٥٦- المدارس الجمالية الكبرى
١٥٧- خسرو وشيرين
١٥٨- هوية فرنسا مج ٢ ، ج ٢
١٥٩- الإيديولوجية
١٦٠- آلة الطبيعة
١٦١- من المسرح الإسباني
١٦٢- تاريخ الكنيسة
١٦٣- موسوعة علم الاجتماع
١٦٤- شامبوليون (حياة من نور)
١٦٥- حكايات الثلج
١٦٦- العلاقات بين اللتين واللعنات في إسرائيل
١٦٧- في عالم طاغور
١٦٨- دراسات في الأدب والثقافة
١٦٩- إبداعات أدبية
١٧٠- الطريق
١٧١- وضع حد
١٧٢- حجر الشمس
١٧٣- معنى الجمال
١٧٤- صناعة الثقافة السوداء
١٧٥- التليفزيون في الحياة اليومية
١٧٦- نحو مفهوم للاقتصاديات البيئية
١٧٧- أنطون تشيخوف
١٧٨- مختارات من الشعر اليوناني الحديث
١٧٩- حكايات أيسوب
١٨٠- قصة جاويد
١٨١- النقد الأدبي الأمريكي
١٨٢- العنف والنبوة
١٨٣- جان كوكتو على شاشة السينما
- كارلوس فوينتس
ميجيل دي ليس
تانكريد مورست
إنريكي أندرسون إمبرت
عاطف فضول
روبرت ج ليتمان
فرنان برودل
نخبة من الكتاب
فيولين فاتويك
فيل سليتر
نخبة من الشعراء
جى أنبال وآلان وأوديت فيرمو
النظامي الكنوجي
فرنان برودل
ديفيد هوكس
بول إيرليش
اليخاندرو كاسونا وأنطونيو جالا
يوحنا الأسوي
جوردن مارشال
جان لاکوتير
أ. ن أفانا سيفا
يشعياهو ليفمان
رايندرانات طاغور
مجموعة من المؤلفين
مجموعة من المبدعين
ميغيل دليبيس
فرانك بيجو
مختارات
ولتر ت. ستيس
أيليس كاشمور
لورينزو فيلشس
توم تيتنبرج
هنري تروايا
نخبة من الشعراء
أيسوب
إسماعيل فصيح
فنسنت ب. ليتش
وب. بيتس
رينيه جيلسون
- ت: أحمد حسان
ت: علي عبدالرؤوف البعبي
ت: عبدالغفار مكارى
ت: علي إبراهيم علي متوفى
ت: أسامة إسبر
ت: منيرة كروان
ت: بشير السباعي
ت: محمد محمد الخطابي
ت: فاطمة عبدالله محمود
ت: خليل كلفت
ت: أحمد مرسى
ت: مى التلمساني
ت: عبدالعزيز بقوش
ت: بشير السباعي
ت: إبراهيم فتحي
ت: حسين بيومي
ت: زيدان عبدالطيم زيدان
ت: صلاح عبدالعزيز محبوب
ت: مجموعة من المترجمين
ت: نبيل سعد
ت: سهير المصايفة
ت: محمد محمود أبو غدير
ت: شكري محمد عياد
ت: شكري محمد عياد
ت: شكري محمد عياد
ت: بسام ياسين رشيد
ت: هدى حسين
ت: محمد محمد الخطابي
ت: إمام عبد الفتاح إمام
ت: أحمد محمود
ت: وجيه سمعان عبد المسيح
ت: جلال البنا
ت: حصة إبراهيم المنيف
ت: محمد حمدي إبراهيم
ت: إمام عبد الفتاح إمام
ت: سليم عبد الأمير حمدان
ت: محمد يحيى
ت: ياسين طه حافظ
ت: فتحي العشري

١٨٤- القاهرة... حالة لا تنام	هانز إيندورفر	ت: دسوقي سعيد
١٨٥- أسفار العهد القديم	توماس تومسن	ت: عبد الوهاب علوب
١٨٦- معجم مصطلحات هيجل	ميخائيل أنوود	ت: إمام عبد الفتاح إمام
١٨٧- الأرضة	بُزرج علوى	ت: علاء منصور
١٨٨- موت الادب	الفين كرنان	ت: بدر الديب
١٨٩- العمى والبصيرة	بول دى مان	ت: سعيد الغانمى
١٩٠- محاورات كونفوشيوس	كونفوشيوس	ت: محسن سيد فرجاني
١٩١- الكلام رأسمال	الحاج أبو بكر إمام	ت: مصطفى حجازي السيد
١٩٢- سياحت نامه إبراهيم بيك ج١	زين العابدين المراغى	ت: محمود سلامة علاوى
١٩٣- عامل المنجم	بيتز أبراهامز	ت: محمد عبد الواحد محمد
١٩٤- مختارات من النقد الأنجلو-أمريكي	مجموعة من النقاد	ت: ماهر شفيق فريد
١٩٥- شتاء ٨٤	إسماعيل فصيح	ت: محمد علاء الدين منصور
١٩٦- المهلة الأخيرة	فالتين راسبوتين	ت: أشرف الصباغ
١٩٧- الفاروق	شمس العلماء شبلى النعمانى	ت: جلال السعيد الحفناوى
١٩٨- الاتصال الجماهيرى	ادوين إمزى وآخرون	ت: إبراهيم سلامة إبراهيم
١٩٩- تاريخ يهود مصر فى الفترة العثمانية	يعقوب لاندائى	ت: جمال احمد الرفاعى وأحمد عبد اللطيف حماد
٢٠٠- ضحايا التنمية	جيرمى سيبروك	ت: فخرى لبيب
٢٠١- الجانب الدينى للفلسفة	جوزايا رويس	ت: أحمد الانصار
٢٠٢- تاريخ النقد الأدبى الحديث ج١	رينيه ويليك	ت: مجاهد عبد المنعم مجاهد
٢٠٢- الشعر والشاعرية	الطاف حسين حالى	ت: جلال السعيد الحفناوى
٢٠٤- تاريخ نقد العهد القديم	م. سولوفيتشيك، ز. روفشوف	ت: أحمد محمود هويدي
٢٠٥- الجينات والشعوب واللغات	لويجى لوقا كافاللى- سفورزا	ت: أحمد مستجير
٢٠٦- الهبولية تصنع علما جديدا	جيمس جلايك	ت: على يوسف على
٢٠٧- ليل إفريقى	رامون خوتاسندير	ت: محمد أبو العطا عبد الرؤوف

CHAOS

Making a New Science

J a m e s G l e i c k

الهيولية علم جديد، ربما لم يسمع عنه بعد الأكثرية من قراء العربية. وهو علم ينتمى من الوجهة الرسمية للرياضيات، فهو فرع من فروعها. وبينما تنقسم الرياضيات عُرْفًا إلى بحتة وتطبيقية، فهذا الفرع الحديث يجمع بين الجانبين. وفى جانبه التطبيقي، لم يترك مجالاً علمياً إلا وقد اقتحمه.

يتناول هذا الكتاب العلوم الآتية: -

- الرياضيات البحتة
- الفيزياء
- علم النفس
- الاقتصاد
- الفلك
- الطب
- الجيولوجيا
- علم الزلازل
- البيولوجيا والعلوم البيئية
- الاتصالات

لقد خاض مؤسسو علم الهيولية درباً غاية فى الوعورة، فصدقهم الله وعده ألا يضيع عمل المحسنين، ويكفيهم اليوم فخراً، بعد أن أحنى الكل أخيراً رؤوسهم لهم إجلالاً، أن إليهم تنسب الثورة العلمية الثالثة فى القرن العشرين. بعد ثورة النظرية الكمية والنظرية النسبية.